



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de un deslizamiento en el Valle de Arán y simulación mediante el método del punto material.

Trabajo realizado por:

Pau Perdices Cos

Dirigido por:

Núria M. Pinyol

Marcel Hürlimann

Máster en:

Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Barcelona, **enero de 2019**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

ÍNDICE

RESUMEN	1
RESUM	3
ABSTRACT	5
AGRADECIMIENTOS.....	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos y metodología	10
1.3. Estructura del documento.....	10
2. BASES DEL MÉTODO DEL PUNTO MATERIAL	11
2.1. Métodos numéricos en geotecnia	11
2.2. Métodos de malla	11
2.3. Métodos de partículas	12
2.4. Origen y características del Método del Punto Material	12
2.5. Formulación del MPM.....	13
2.6. Ventajas e inconvenientes del MPM.....	15
2.7. MPM en problemas hidro-mecánicos	15
3. EL DESLIZAMIENTO DE VALARTIES, VALLE DE ARÁN.....	17
3.1. Descripción del fenómeno	17
3.2. Condiciones meteorológicas e hidráulicas.....	20
3.3. Trabajo de campo.....	20
3.4. Caracterización geológica y geotécnica	21
3.5. Trabajo de laboratorio	23
4. MODELIZACIÓN ESTÁTICA DEL DESLIZAMIENTO	27
4.1. Software utilizado	27
4.2. Modelo estático	27
4.3. Resultados	28

5.	MODELIZACIÓN DINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO.....	31
5.1.	Software utilizado	31
5.2.	Geometría inicial	31
5.3.	Materiales	32
5.4.	Condiciones de contorno	33
5.5.	Mallado y puntos materiales.....	34
5.6.	Esquema de cálculo.....	35
6.	RESULTADOS	37
6.1.	Caso base: Material seco y modelo constitutivo Mohr-Coulomb.....	37
6.2.	Variante 1: Material seco y modelo constitutivo Mohr-Coulomb con reblandecimiento	40
6.3.	Comparativa dinámica de los distintos casos	44
7.	CONCLUSIONES	45
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	49
9.	ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	51
	Índice de figuras	51
	Índice de tablas	52

RESUMEN

Los deslizamientos o flujos de tierra en laderas son un problema muy frecuente en todo el mundo que provocan graves pérdidas humanas, económicas y materiales. El análisis de estos fenómenos se acostumbra a enfocar desde un punto de vista estático, centrándose en el inicio del movimiento y sin prestar especial atención a los factores dinámicos (velocidad y alcance), claves en la peligrosidad del suceso. Uno de los problemas presentes en los análisis del comportamiento de laderas después de la rotura es la dificultad de analizarlos mediante métodos continuos eulerianos, como la versión estándar del método de los elementos finitos, donde modelar grandes deformaciones conduce a problemas de distorsión de malla, que afectan gravemente a la solución.

Los métodos numéricos formulados de forma Lagrangiana (conocidos como métodos de partículas), o los que combinan ambas formulaciones, pretenden solventar estos problemas de distorsión de malla a través de diferentes estrategias. Uno de estos métodos es el método del punto material, especialmente diseñado para simular grandes deformaciones. Este método fue inicialmente desarrollado en el campo de la mecánica de fluidos y, posteriormente se ha aplicado al campo de la geotecnia. Actualmente, diferentes centros de investigación y universidades están desarrollando códigos basados en este método. En concreto, esta tesina emplea uno de estos códigos, Anura3D, con el objetivo de testear sus aplicaciones en un caso real ocurrido recientemente en el Pirineo catalán.

El deslizamiento en cuestión es un flujo de tierras ocurrido en mayo de 2018 en el valle de Valarties (Valle de Arán) en el que se movilizaron unos 50000 m³ de material glacial y coluvial, recorriendo unos 300 metros hasta el fondo del valle y remontando 100 metros en la ladera opuesta. Los datos de partida incluyen la geometría inicial y final del movimiento.

La tesina presenta la caracterización de este deslizamiento a partir de trabajos de campo, laboratorio y modelización. El trabajo ha consistido en la toma de muestras de los distintos materiales, análisis granulométrico, límites de Atterberg y ensayos de corte anular con el fin de obtener parámetros resistentes del terreno. También se ha realizado un modelo estático convencional bajo diferentes hipótesis como punto de partida del posterior modelo en MPM.

En la modelización dinámica del flujo se emplea como modelo constitutivo el modelo de Mohr-Coulomb, que sirve como primera aproximación, pero que no logra reproducir el comportamiento observado en el campo. En consecuencia, se introducen conceptos de plasticidad con reblandecimiento y se calibra el valor residual de la resistencia a partir de la geometría final del deslizamiento observado en campo.

Se puede concluir que un simple modelo elastoplástico friccional perfecto no es capaz de modelar el comportamiento observado en términos de desplazamiento máximo. Para explicar los casi 400 metros de recorrido observado, remontando la ladera opuesta, se requieren probablemente modelos más complejos capaces de modelar el flujo granular (introduciendo el efecto de la colisión entre granos). El trabajo realizado demuestra que bajos valores de la resistencia correspondiente a ángulos de fricción del orden de 10 °, permite simular el alcance del deslizamiento observado.

Palabras clave: *deslizamiento, grandes deformaciones, método punto material, caso real.*

RESUM

Les esllavissades o fluxos de terra en vessants de muntanya són un problema força freqüent a tot el món que provoquen greus pèrdues humanes, econòmiques i materials. L'anàlisi d'aquests fenòmens s'acostuma a enfocar des d'un punt de vista estàtic, centrant-se en l'inici del moviment i sense prestar especial atenció als factors dinàmics (velocitat y abast), claus en la perillositat del succés. Un dels problemes presents en els anàlisis del comportament de vessants després del trencament es la dificultat d'analitzar-los mitjançant mètodes continus eulerians, com la versió estàndard del mètode dels elements finits, on modelar grans deformacions condueix a problemes de distorsió de malla, que afecten greument a la solució.

Els mètodes numèrics formulats de forma Lagrangiana (coneguts com mètodes de partícules), o els que combinen ambdues formulacions, pretenen solucionar aquests problemes de distorsió de malla a través de diferents estratègies. Un d'aquets mètodes és el mètode del punt material, especialment dissenyat per a simular grans deformacions. Aquest mètode fou inicialment desenvolupat en el camp de la mecànica de fluids i, posteriorment s'ha aplicat en el camp de la geotècnia. Actualment, diferents centres d'investigació i universitats estan desenvolupant codis basats en aquest mètode. En concret, aquesta tesina empra un d'aquests codis, Anura3D, amb l'objectiu de testar les seves aplicacions en un cas real ocorregut recentment al Pirineu català.

L'esllavissada en qüestió és un flux de terres ocorregut el maig de 2018 a la vall de Valarties (Vall d'Arán) en el que es van mobilitzar uns 50000 m³ de material glacial i col·luvial, recorrent uns 300 metres fins el fons de la vall i remuntant 100 metres en el vessant oposat. Les dades de partida inclouen la geometria inicial i final del moviment.

La tesina presenta la caracterització d'aquesta esllavissada a partir de treballs de camp, laboratori i modelització. El treball ha consistit en la presa de mostres dels diferents materials, anàlisis granulomètric, límits d'Atterberg i assajos de tall anular amb la finalitat d'obtenir paràmetres resistents del terreny. També s'ha realitzat un model estàtic convencional sota diferents hipòtesis com a punt de partida del posterior model en MPM.

En la modelització dinàmica del flux s'empra com a model constitutiu el model de Mohr-Coulomb, que serveix de primera aproximació, però que no aconsegueix reproduir el comportament observat en el camp. En conseqüència, s'introdueixen conceptes de plasticitat amb reblaniment i es calibra el valor residual de la resistència a partir de la geometria final del trencament observat al camp.

Es pot concloure que un simple model elastoplàstic friccional perfecte no es capaç de modelar el comportament observat en termes de desplaçament màxim. Per explicar els casi 400 metres de recorregut observat, remuntant el vessant oposat, es requereix probablement models més complexos capaços de modelar el flux granular (introduint l'efecte de la col·lisió entre grans). El treball realitzat demostra que baixos valors de la resistència corresponent a angles de fricció de l'ordre de 10 °, permet simular l'abast del flux observat.

Paraules clau: *esllavissada, grans deformacions, mètode punt material, cas real.*

ABSTRACT

Landslides or earth fluxes in mountain slopes are a first order problem in many places, leading to important human, economic and material losses. These phenomena are usually analysed from a static point of view, focusing the attention on the triggering of the movement and obviating dynamic factors (such as velocity and range of movement), key in the hazard of the event. One of the main problems analysing post-failure behaviour in mountain slopes is due to the difficulties of using eulerian continuum methods, such as the standard version of Finite Element Method. This kind of numerical methods induce mesh distortion phenomena when modelling big deformations, which gravely affect the solution.

Lagrangian numerical methods (known as particle methods), or the ones combining both formulations, pretend to solve such mesh distortion problems through different strategies. One of these methods is the Material Point Method, especially designed to simulate big deformations. Initially, it was developed in the mechanical fluids field and, afterwards, applied in geotechnics. Nowadays, different research centres and universities are developing codes based in this method. In particular, this thesis utilizes one of these codes, Anura3D, in order to test its applications in a real case that recently occurred in the Catalan Pyrenees.

The landslide at issue is an earth flux occurred in May 2018 in the Valarties valley (Aran Valley) where about 50.000 m³ of glacial and colluvial material were mobilized, travelling about 300 meters until de valley bed and surmounting 100 meters on the opposite slope. The baseline data include the initial and final geometry of the movement.

The thesis presents the characterization of this landslide based on fieldwork, lab and numerical modelling. The field and lab work consisted in the sample collection of different materials, granulometric analysis, Atterberg limits and annular shear tests in order to obtain the terrain's resistant parameters. Moreover, it has been performed a conventional static model under different hypothesis as starting point of the posterior model in MPM.

A Mohr-Coulomb constitutive model is used in order to perform the dynamic modelling of the flux, which is useful as first approach, but does not succeed in reproducing the behaviour experienced in the field. In consequence, softening plasticity concepts are introduced and the residual strength values are calibrated taking into account the field failure geometry.

It may be concluded that a simple perfect elastoplastic frictional model is not able to simulate the behaviour appreciated in terms of maximum displacement. In order to explain the almost 400 metres covered, even surmounting the opposite slope, is probably required more complex models able of modelling granular flux (introducing the effect of grains' collision). The work performed demonstrates that low strength values corresponding to a frictional angle about 10°, allow to simulate the range of movements observed.

Keywords: *landslide, big deformations, material point method, real case.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis tutores, Núria y Marcel, por su dedicación, tiempo y útiles consejos que me han guiado en la realización de esta tesis.

Al personal del laboratorio de Mecánica de Suelos de la UPC, sobre todo a Rodrigo, por la formación y ayuda prestada en la realización de los ensayos.

A los técnicos del Conselh Generau d'Aran, por proporcionar toda la información requerida en la que se basa este trabajo.

A mi familia, en especial a mis padres y abuelos, por darme la oportunidad de formarme y enseñarme desde pequeño la importancia del trabajo y la constancia.

Por último, quisiera agradecer a mis amigos, pareja y compañeros de clase que me han acompañado en los buenos y en los malos momentos durante esta época universitaria que ahora termina.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El invierno y la primavera de 2018 en los Pirineos ha sido una época de regulares e intensas precipitaciones después de un período de sequía. Este hecho ha propiciado que sea un año especialmente intenso en cuanto a deslizamientos o flujos de tierra. Las afecciones en infraestructuras viarias en la zona pirenaica por estos fenómenos son una constante, causando en algún caso víctimas mortales, así como cortes de tráfico que afectan a los habitantes de las comarcas de montaña, al turismo y a la economía de la zona.

La estabilidad de taludes y laderas naturales es un problema ampliamente estudiado en el mundo de la ingeniería civil, enfocado usualmente de manera clásica como un problema estático. De esta forma se obtiene tan sólo un factor de seguridad frente a rotura, obviando los factores dinámicos de los cuales depende la peligrosidad y, finalmente, el riesgo potencial asociado al fenómeno como son la velocidad y el desplazamiento del terreno movilizado.

En lo que se refiere a la modelización dinámica de deslizamientos de tipo flujo, los métodos basados en elementos finitos, ampliamente desarrollados en las últimas décadas, no son un método ideal para modelizar este tipo de fenómeno ya que se basan en hipótesis de pequeñas deformaciones. En este contexto, han surgido una serie de métodos que intentan solventar los defectos de los elementos finitos en problemas dinámicos, uno de ellos es el empleado en este trabajo, el Método del Punto Material (MPM). Soga et al. 2016 presenta un interesante estado del arte de los métodos usados para la simulación de grandes deformaciones y una descripción más detallada del método del punto material.

El 11 de mayo de 2018 en el valle de Valarties, en la comarca catalana del Valle de Arán hubo un flujo de tierra que movilizó alrededor de 50.000 m³ de material (Figura 1). Desde la cota más alta de la cicatriz hasta el fondo del valle hay una diferencia de altitud de 150 m y el deslizamiento remontó 20 m en contrapendiente, recorriendo un total de 381 m en 15 segundos, lo que supone una velocidad media de unos 90 km/h (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2018).

Este fenómeno dinámico es una buena oportunidad para comprobar la eficacia del MPM en la modelización y análisis de corrimientos de tierra de grandes dimensiones.



Figura 1: Imágenes del deslizamiento tomadas 10 días después del suceso.

1.2. Objetivos y metodología

El objetivo principal de esta tesina es el estudio y la modelización mediante el Método del Punto Material (MPM) del deslizamiento ocurrido en Valarties en mayo de 2018. Para ello, previamente se deben cumplir una serie de objetivos secundarios, descritos a continuación:

- Recopilación y análisis crítico de la información disponible.
- Caracterización geológica y geotécnica del terreno. Se pretende obtener la geometría y litología del terreno movilizado, así como las características mecánicas del suelo. Para ello se realizarán visitas de campo y ensayos de laboratorio sobre muestras extraídas del propio deslizamiento y alrededores. Se comparará la información con la disponible en los informes técnicos oficiales que se han realizado sobre este movimiento de tierras.
- Realización de un análisis estático convencional de la situación previa a la rotura con el objetivo de obtener los parámetros resistentes por retroanálisis. Los valores obtenidos se compararán con los obtenidos en los ensayos de laboratorio. La calibración realizada se empleará en el modelo posterior para la simulación del comportamiento post-rotura. Para ello se empleará el software SLIDE (Rocscience 2002).
- Comprensión de la base teórica y numérica del MPM y aplicación práctica mediante el código en desarrollo Anura 3D (MPM Research Community, Tutorial and Scientific Manuals 2017)
- Modelización del deslizamiento bajo distintas hipótesis.
- Análisis y discusión de los resultados numéricos obtenidos y análisis de sensibilidad para determinar la robustez de los cálculos.

Cabe destacar que en ningún caso es objeto de este trabajo analizar las posibles causas del deslizamiento. El alcance de este se centra en la comprensión y modelización del fenómeno dinámico ocurrido mediante un método numérico en desarrollo.

1.3. Estructura del documento

El documento se organiza en una serie de capítulos, divididos a la vez en subapartados. En el presente capítulo se introduce el tema de estudio y se definen unos objetivos (*cap. 1: Introducción*) y, en los capítulos posteriores se exponen las bases teóricas del MPM (*cap. 2: Bases del método del punto material*), se presenta el fenómeno natural analizado (*cap. 3: El deslizamiento de Valarties, Valle de Arán*), se explica el proceso de modelización y resultados del modelo estático convencional (*cap. 4: Modelización estática del deslizamiento*), y del modelo dinámico (*cap. 5: Modelización dinámica del deslizamiento*). En el sexto capítulo se presentan y discuten los resultados (*cap. 6: Resultados*) y el séptimo capítulo sirve para sintetizar las conclusiones obtenidas (*cap. 7: Conclusiones*).

Al final del documento se encuentra un listado con las referencias bibliográficas empleadas, así como una tabla resumen de las referencias a figuras y tablas. Las menciones a bibliografía se encuentran en el cuerpo del texto y la numeración y título de las imágenes y tablas se encuentra al pie y cabeza, respectivamente, de estas.

2. BASES DEL MÉTODO DEL PUNTO MATERIAL

2.1. Métodos numéricos en geotecnia

En el mundo de la ingeniería y, más concretamente, en la geotecnia, es frecuente el uso de modelos para explicar las observaciones de los distintos fenómenos estudiados. Los modelos pueden ser analíticos, físicos y numéricos, sin embargo, con el desarrollo en el campo de la computación, estos últimos han tenido un gran auge por su bajo coste y buenos resultados.

Los modelos numéricos resuelven problemas basándose en modelos matemáticos que contienen los principios mecánicos y los modelos constitutivos de los materiales. Las ecuaciones gobernantes del problema que resultan se discretizan para poder ser resueltas mediante sistemas finitos de ecuaciones.

La primera distinción a tener en cuenta en un modelo geotécnico es si es continuo o discontinuo. En los modelos discontinuos o discretos se modela la interacción entre las partículas que forman el material, siendo adecuados para determinar el comportamiento microscópico de materiales granulares. Tienen un elevado coste computacional que dificulta su aplicación en modelos ingenieriles, por lo que, de momento su uso se centra en aplicaciones científicas.

Los modelos más empleados en ingeniería y geotecnia son los modelos continuos, en que cada fase (sólido, agua y aire en caso de medio poroso) ocupan todo el dominio, formando un continuo superpuesto. Las ecuaciones gobernantes pueden ser expresadas de forma Lagrangiana si se observa el flujo desde una partícula en movimiento o Euleriana si se observa desde una posición fija.

Dentro de los modelos continuos encontramos los modelos basados en una malla y los modelos basados en la partícula. (Ceccato 2014)

2.2. Métodos de malla

En los métodos de malla se discretiza el dominio continuo en elementos formando una malla y resolviendo las ecuaciones gobernantes en los nodos de los elementos. Los métodos de malla clásicos son el Método de las Diferencias Finitas (MDF), el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de los Volúmenes Finitos (MVF).

El inicio del uso de métodos de malla (MDF primero y MEF posteriormente) en geotecnia se remonta a los 60, cuando se utilizó para determinar tensiones y movimientos en terraplenes; sin embargo, el uso del MEF como método generalizado y habitual para el estudio de problemas geotécnicos se ha retrasado más que en otros campos de la ingeniería, seguramente debido a los muchos condicionantes y variables propias de la geotecnia. (Castellví y Alonso 2015)

El método de malla más empleado en geotecnia es el MEF en forma Lagrangiana, en que la malla se deforma con el material.

Entre las principales características del MEF está la adaptabilidad a geometrías complicadas con relativa facilidad y la posibilidad de resolver problemas hidromecánicos acoplados con eficacia. Su principal limitación es la dificultad para modelar grandes deformaciones, ya que en estos casos la malla sufre graves distorsiones que afectan notablemente a la precisión del cálculo.

Para intentar resolver los problemas de distorsión de malla surgen metodologías que combinan la descripción Lagrangiana y Euleriana con técnicas de adaptación de malla que suponen elevados incrementos de coste computacional. (Yerro 2015)

2.3. Métodos de partículas

En este contexto surgen los métodos de partículas o sin malla para intentar dar solución a las limitaciones de los métodos clásicos de malla.

Los métodos de partículas se caracterizan por que el dominio se discretiza en un conjunto de partículas, también llamados puntos materiales, que se mueven junto con el material (descripción lagrangiana) y en los que se almacena las propiedades físicas y la historia de las variables de estado. Al no estar estos puntos materiales ligados a la malla, se evitan una serie de problemas relacionados con esta. El coste computacional de estos métodos es, en general, superior al de los métodos clásicos MDF y MEF.

Los métodos de partículas se pueden agrupar en la siguiente clasificación: (Castellví y Alonso 2015)

- **Métodos MWLS (methods based on the moving weighted least square approximation):** Algunos ejemplos son el *Generalized Finite Difference Method*, el *Diffuse Element Method* o el *Element-Free Galerkin Method* (EFG).
- **Métodos Kernel:** Los más conocidos son el *Smoothed Particle Hydrodynamics Method* (SPH) y el *Reproducing Kernel Particle Method* (RKPM).
- **Métodos de partición de la unidad:** Dos ejemplos son el *Partition of Unity Finite Element Method*, *h-p Clouds Method*.
- **Métodos derivados del método Particle-in-cell (PIC):** Método del Punto Material (MPM) y el *Lagrangian Integration Point Finite Element Method*.
- **Métodos discretos:** El *Discrete Element Method* (DEM) es uno de los métodos sin malla más extendidos.

2.4. Origen y características del Método del Punto Material

En 1964, Harlow et al. estudiaron el flujo de un fluido mediante un método del tipo Particle-in-cell (PIC) para el análisis de problemas de dinámica de fluidos. Este método utilizaba partículas en movimiento a través de una malla fija.

Sulsky et al. (1994) adaptaron el método a problemas de dinámica de sólidos con el objetivo de analizar problemas con grandes deformaciones. En las últimas dos décadas el MPM ha sido desarrollado y se ha aplicado satisfactoriamente en diferentes campos de la ingeniería.

En el campo de la geomecánica se ha utilizado para estudiar el flujo de materiales granulares (Wieckowski et al. 1999); para modelar anclajes en el terreno (Coetzee et al. 2005); para estudiar procesos de excavación y efectos de arrastre (Coetzee et al. 2007) y (Mackenzie-Helnwein et al. 2010); simular deslizamientos y roturas de taludes (Zabala y Alonso 2011) y (Yerro, Pinyol y Alonso 2015); e interacciones entre suelo y estructura en ensayos de penetración de cono (Al-Kafaji 2013).

El Método del Punto Material combina ideas del FEM con los métodos sin malla. El dominio se discretiza simultáneamente de dos formas: en primer lugar, se utiliza un conjunto de puntos materiales que describen el movimiento del material de forma Lagrangiana, y por otro lado se define una malla Euleriana fija definida en todo el dominio computacional. De esta forma, mientras que cada punto material lleva asociadas todas las variables que definen el estado del subdominio que representa (tensión, deformación, densidad e historia), la malla computacional se usa para resolver las ecuaciones del movimiento de una manera similar a la utilizada en el FEM. La gran diferencia respecto al FEM es que, al ser los puntos materiales los que transportan la información y el estado del material, la malla puede redefinirse en cada iteración, eliminando así los problemas asociados a la distorsión de malla.

2.5. Formulación del MPM

La formulación del MPM es muy parecida a la del MEF; las ecuaciones gobernantes, la forma débil y los sistemas de ecuaciones nodales son iguales. Lo más distintivo de ambos métodos es el cálculo de la integración numérica sobre volumen finito: mientras que en el MEF se emplea la cuadratura de Gauss en MPM se basa en los puntos materiales.

A continuación, se resume la formulación para el caso más básico, el de una sola fase sólida de material. (Anura3D Scientific Manual, 2017), (Al-Kafaji 2013), (Yerro 2015), (Ceccato 2014), (Castellví y Alonso 2015).

- Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones que gobiernan el problema son las de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\rho &= \rho \nabla \cdot \mathbf{v}_S \\ \rho \frac{d\mathbf{v}_S}{dt} &= \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}\end{aligned}$$

Donde ρ es la densidad del continuo, \mathbf{v}_S la velocidad de la fase sólida, $\boldsymbol{\sigma}$ el tensor de tensiones y \mathbf{b} el vector de fuerzas específicas sobre el cuerpo.

- Discretización espacial

El continuo se discretiza mediante puntos materiales que transportan las propiedades físicas del subdominio que representan (Figura 2).

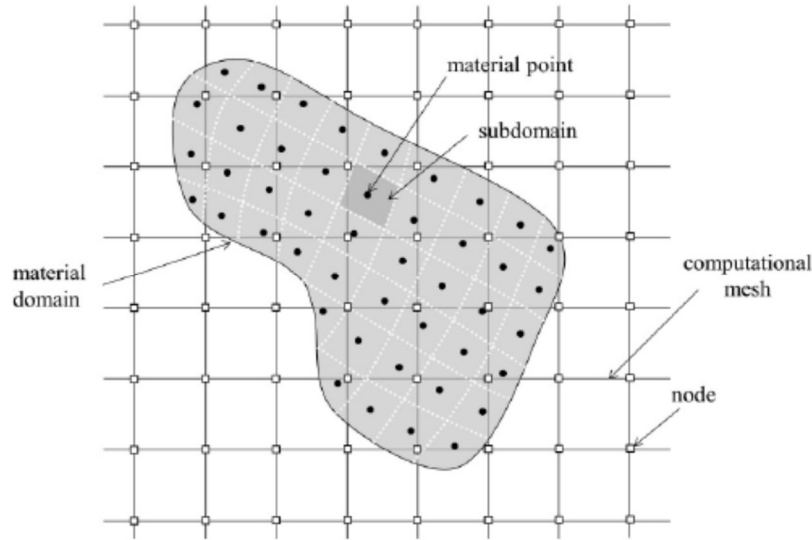


Figura 2: Discretización espacial en MPM (Yerro 2015).

En el MPM, la masa de cada subdominio se considera concentrada en su punto material correspondiente y constante durante todo el cálculo, por lo que la ecuación de conservación de la masa se verifica automáticamente. Por esta razón, solo se debe discretizar la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. Aplicando el método de Galerkin se obtiene la siguiente expresión:

$$\int_{\Omega} \delta \mathbf{v}_S \rho \frac{d\mathbf{v}_S}{dt} d\Omega = - \int_{\Omega} (\nabla \cdot \delta \mathbf{v}_S) \boldsymbol{\sigma}_S d\Omega + \int_{\partial\Omega_T} \delta \mathbf{v}_S \cdot \boldsymbol{\tau}_S dS + \int_{\Omega} \delta \mathbf{v}_S \rho \mathbf{b} d\Omega$$

Las ecuaciones se integran en el dominio Ω y aplicando el teorema de Gauss también en el contorno de este, $\partial\Omega = \partial\Omega_U + \partial\Omega_T$, en los que se aplica desplazamientos y tracciones respectivamente. δv_s es la función test o velocidad virtual del sólido, que toma valor nulo en el contorno $\partial\Omega_U$.

Para calcular las integrales de la forma débil, se discretiza en los nodos de una malla Euleriana. A partir de las funciones de forma $N_i(x)$ se pueden describir desplazamientos en los puntos materiales:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{N_n} u_i(t) N_i(x) \quad ; \quad v(x, t) = \sum_{i=1}^{N_n} v_i(t) N_i(x) \quad ; \quad a(x, t) = \sum_{i=1}^{N_n} a_i(t) N_i(x)$$

A los elementos de la malla euleriana que contienen puntos materiales se les llama elementos activos, mientras que los elementos vacíos que no tienen ninguna información son ignorados, reduciendo así el coste computacional.

- Discretización temporal

Se subdivide el tiempo (t) en un número finito de pasos (k). En MPM la discretización del tiempo se hace mediante un algoritmo explícito, lo cual implica que el algoritmo sea condicionalmente estable. Para asegurar la estabilidad de la solución, se debe realizar un análisis de estabilidad para determinar el incremento de tiempo crítico.

A partir de las ecuaciones presentadas anteriormente se obtiene la expresión discretizada:

$$\sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^k a_j^k = b_i^k + \hat{t}_i^k - \sum_{p=1}^{N_n} M_p G_{ip}^k \cdot \sigma_p^{S,k}$$

Donde:

$$\sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^k a_j^k$$

$b_i^k + \hat{t}_i^k$ es el vector de fuerzas externas

$\sum_{p=1}^{N_n} M_p G_{ip}^k \cdot \sigma_p^{S,k}$ es el vector de fuerzas internas

- Esquema resolutivo

Para cada intervalo de tiempo y en cada uno de todos los subdominios definidos en la discretización espacial se realiza el siguiente esquema resolutivo que se repite hasta hallar la solución al problema.

1. Fase Inicial: Transmisión de la información de los puntos materiales a la malla utilizando mínimos cuadrados ponderados para determinar las velocidades nodales a partir de las de los puntos materiales.

2. Fase Lagrangiana: Resolución de las ecuaciones del movimiento en la malla y actualización de los puntos materiales. Resolviendo la ecuación de cantidad de movimiento se obtienen la aceleración y velocidad en los nodos, que sirven para actualizar la velocidad y posición de los puntos materiales. Conociendo las velocidades nodales se calculan los incrementos de deformación de los puntos materiales y, junto con la historia previa del material, se aplican las ecuaciones constitutivas del material para obtener los incrementos de tensión y actualizar posteriormente las tensiones y deformaciones en los puntos materiales.

3. Fase Convectiva: Al no contener ninguna información asociada, se puede redefinir la malla de la forma más conveniente en relación al desplazamiento de los puntos materiales. Se suele imponer la estructura inicial.

2.6. Ventajas e inconvenientes del MPM

Al combinar las descripciones Lagrangiana y Euleriana en el esquema de cálculo, en MPM se evitan los inconvenientes de cada una. Además, se evitan los problemas de distorsión de malla característicos de los MEF, pero manteniendo la facilidad de implementación de las condiciones de contorno que este ofrece. En el caso de condiciones de contorno móviles, estas se pueden aplicar directamente sobre los puntos materiales.

Al basarse la formulación MPM en las ecuaciones del continuo se pueden aplicar eficazmente modelos constitutivos como el de Mohr-Coulomb o el de Cam-Clay. Resulta de especial interés la elección de modelos constitutivos en los que el material depende de su historia, ya que la información se almacena en los puntos materiales, hecho que permite el seguimiento temporal y espacial de las variables dependientes de su historia.

Otra ventaja del método es la posibilidad escoger si la aplicación de las fuerzas externas se hace sobre los nodos de la malla computacional o sobre los puntos materiales, permitiendo simular condiciones de contorno móviles.

En lo que se refiere al empleo del MPM, se deben considerar algunas limitaciones respecto a los métodos numéricos convencionales en relación a la condición de estabilidad para la integración en el tiempo de las ecuaciones de movimiento y a los tiempos computacionales.

Al tratarse de un esquema explícito, el valor crítico de incremento de tiempo que asegure la estabilidad de la solución puede ser significativamente más pequeño que en el caso de la formulación implícita empleada en FEM estándar.

El coste computacional es elevado debido al paso de información entre los nodos de la malla computacional y los puntos materiales. Este inconveniente se puede mitigar con la implementación de técnicas computacionales en paralelo. Cabe mencionar que los tiempos computacionales son inferiores a los de otros métodos sin malla, como el SPH o el EFGM, que requieren la búsqueda de partículas cercanas con el consiguiente consumo computacional que esto conlleva.

2.7. MPM en problemas hidro-mecánicos

La mayoría de aplicaciones del MPM realizadas en los últimos tiempos han sido considerando el continuo como un material de una fase sólida. En aplicaciones geotécnicas, es necesario resolver problemas hidro-mecánicos acoplados en medio poroso saturado (fases sólida y líquida) y no saturado (fases sólida, líquida y gaseosa).

Para el caso de modelos de terreno saturado, la formulación básica de MPM se ha extendido de forma que se puede abordar el problema de dos maneras distintas: la formulación sobre un punto (single-point formulation) y la formulación sobre dos puntos (2-point formulation).

La formulación sobre un punto se basa en que cada punto material se mueve con la fase sólida transportando todas las variables que representan el continuo, incluyendo la presión de agua, que es una variable asociada. El mayor inconveniente que presenta es la imposibilidad de simular un nivel de agua variable.

Por otro lado, la formulación sobre dos puntos reparte la información del medio en dos conjuntos de puntos materiales superpuestos. La información del esqueleto sólido se asigna a un conjunto y la de la fase líquida al otro. El inconveniente que presenta esta formulación es el alto coste computacional, consecuencia de la duplicación del número de puntos materiales.

La línea de estudio actual apunta al desarrollo de formulaciones que permitan el estudio de problemas en los que interactúen tres o más fases; ya sea con formulaciones sobre un punto o sobre múltiples. (Castellví y Alonso 2015)

3. EL DESLIZAMIENTO DE VALARTIES, VALLE DE ARÁN

3.1. Descripción del fenómeno

Alrededor de la medianoche del día 11 de mayo de 2018 se produjo un flujo de tierras en el valle de Valarties, cerca de la población de Arties, en la comarca catalana del Valle de Arán (Figura 3). Este suceso dejó cortada durante varias horas la pista de acceso al refugio de Restanca y al pico del Montarto, entrada al Parque Nacional de Aigüestortes, produciendo cortes de subministro eléctrico y afectando a las fincas existentes entre el río Valarties y la pista forestal. (Conselh Generau d'Aran 2018)

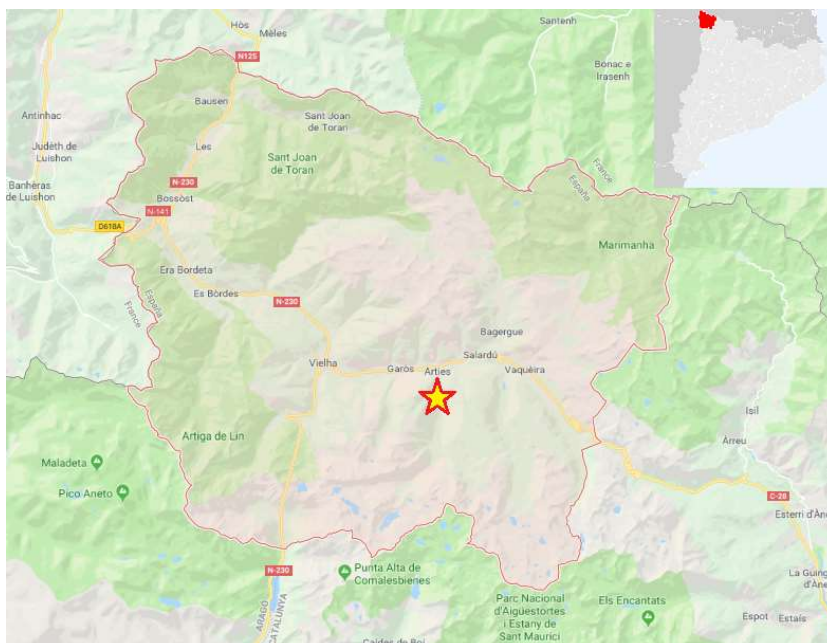


Figura 3: Mapa de situación del deslizamiento; en la esquina superior derecha situación del Valle de Arán dentro de Catalunya. Fuente Google Maps.

Las consecuencias podrían haber sido catastróficas si se hubiera acumulado el terreno movilizado en el fondo del valle, taponando el río Valarties y produciendo una avenida de grandes dimensiones al ceder la presa natural. Sin embargo, el material movilizado remontó la contra-pendiente sin producir ninguna interrupción notable del curso natural del río.



Figura 4: Imágenes tomadas el día posterior del suceso (12/11/18) y cedidas por técnicos del Conselh Generau d'Aran. En la imagen de la izquierda se aprecia la cicatriz del flujo; en la imagen de la derecha se observa el remonte de material permitiendo el paso del río Valarties, aguas arriba del pueblo de Arties.

El terreno se caracteriza por una orografía abrupta y un intenso uso del medio natural. Por el pueblo de Arties pasa la carretera comarcal C-28 que une Vielha con la estación de esquí Baqueira-Beret y con el Pallars Sobirà. En el valle de Valarties, cerca del lugar donde se produjo el flujo se encuentran una cantera, una planta de tratamiento de áridos y numerosas infraestructuras hidráulicas que dan servicio a la central hidroeléctrica de Arties (Figura 5).



Figura 5: Detalle de la zona en la que se produjo el deslizamiento; se aprecia la zona afectada por este (naranja), el pueblo de Arties y las infraestructuras cercanas (carretera C-28, pista forestal de Valarties, cantera, planta de áridos y central hidroeléctrica de Arties). Fuente Google Earth.

En el informe técnico realizado por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (2018) con motivo de este suceso se detalla las principales características del deslizamiento de tierras producido. En la Tabla 1 se resumen las más relevantes para el presente estudio.

Tabla 1. Resumen de las características del flujo.

Fecha	11/05/2018	Recorrido Flujo	
Hora	23:30:15	Hasta el río	280 m
Cota Superior Flujo	1380 m.s.n.m.	En ladera opuesta	101 m
Cota Inferior (río Valarties)	1230 m.s.n.m.	Total	381 m
Cota Superior Flujo en ladera opuesta	1249 m.s.n.m.	Tiempo	≈ 15 s

En la Figura 6 se aprecia (en verde) la cicatriz de la rotura, que tiene un ancho de 60 m y una profundidad de entre 31 y 38 m. En la zona de transporte (color rosa) el flujo ha dejado un perfil erosivo de profundidad media de unos 7 m con profundidad máxima de 15 m, delimitada por unos márgenes muy verticalizados y con la acción erosiva posterior del torrente generado a raíz del flujo que ha formado un cono de deyección (color rojo) en el pie de la ladera. El grueso del material se ha acumulado en la ladera opuesta, en un área de unos 15000 m² con una profundidad máxima de 10 m. Se estima que en el flujo se movilizaron entre 45000 y 52000 m³.

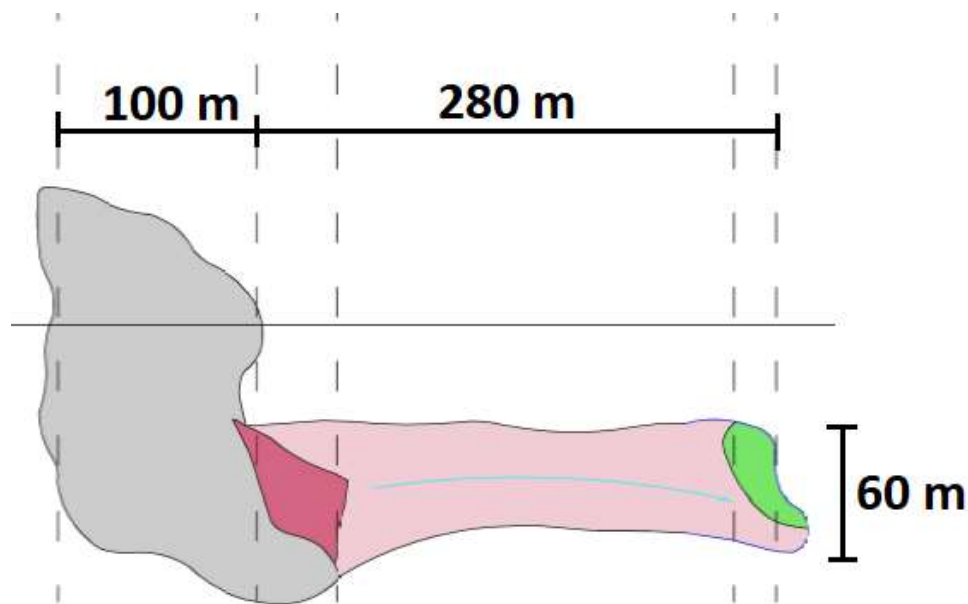


Figura 6: Detalle en planta del flujo. En verde la superficie de rotura, en rosa la zona de transporte, en rojo el cono de deyección del material transportado por el torrente formado y en gris el material acumulado en la ladera opuesta.

A finales de verano el deslizamiento de Valarties volvió a ser noticia por la carga de sedimentos finos que bajaban por el río Valarties y río Garona aguas abajo del suceso, poniendo en peligro el ecosistema fluvial. Parece ser que ocurrió un segundo deslizamiento durante el mes de agosto en el mismo lugar que habría producido la aparición de una segunda fuente de agua subterránea que provoca el arrastre de material fino al río (Segura 2018). Este hecho, en el momento de la redacción del trabajo todavía está bajo muchas incertidumbres, y, pese a que no afecta de primera mano al objeto del trabajo, sí que da una idea de la inestabilidad de la ladera.



Figura 7: Situación de la cicatriz a finales de verano, apreciándose el surco socavado por el torrente provocando deslizamientos laterales (imagen izquierda), transporte de sedimento fino en el río Garona en el pueblo de Casarilh, 4 km aguas abajo del flujo de tierras (imagen derecha).

3.2. Condiciones meteorológicas e hidráulicas

El invierno de 2018 fue un periodo de importantes precipitaciones, por encima de la media climática histórica (1961-1990), como muestran los datos recogidos por las estaciones EMA del servicio meteorológico de Catalunya situadas en Aran (Tabla 2).

Tabla 2: Precipitación mensual en las estaciones EMA del SMC en Aran y precipitación media mensual en el periodo 1961-1990.

Mes	Lac Redon (2247 m)	Sasseuva (2228 m)	Vielha (960 m)	Histórico 1961-90
Enero	197,0	133,1	123,0	75,1
Febrero	351,4	206,1	192,3	60,1
Marzo	191,0	123,9	112,7	63,6
Abril	107,3	92,4	160,3	89,7

Se dispone además de datos pluviométricos de una estación del sistema Smarty River (www.arantec.com) situada a escasos metros del lugar del flujo de tierras (Tabla 3). En estos datos se observa como los registros de lluvia del mes y la semana previos son muy elevados y que, sin embargo, los dos días previos al suceso no se registraron precipitaciones.

Esta misma estación también toma datos del nivel del río cada 15 minutos y se detecta una bajada brusca del nivel a las 23.30 h que se recupera totalmente a las 24.00 h, consecuencia del barraje transitorio del río por el material movilizado en el flujo.

Tabla 3: Datos pluviométricos de la estación Smarty River en el puente de Valarties.

Periodo	Precipitación acumulada [mm]
1 de abril – 11 de mayo	234,4
Abril de 2018	142,9
11 días previos al suceso	91,5
7 días previos al suceso	57,5
2 días previos al suceso	0

Es evidente que la elevada pluviometría registrada juega un papel importante en la desestabilización de la ladera en estudio. A la vez, es muy difícil determinar con exactitud la evolución del nivel freático y de las presiones intersticiales en los tiempos previos a la rotura.

3.3. Trabajo de campo

En los días posteriores al suceso, un grupo de investigadores de la UPC se desplazó a la zona para visitar el deslizamiento y tomar muestras de los diferentes tipos de material que se apreciaban. En fechas posteriores se han realizado visitas de campo para tomar imágenes y analizar la evolución de la cicatriz del deslizamiento.

El acceso por carretera al lugar es bueno, sin embargo, adentrarse ladera arriba se complica por tener que cruzar el río, las fuertes pendientes y la inestabilidad de la cicatriz del deslizamiento. Con el paso del verano, el torrente que se forma con el agua que surge de la cicatriz ha ido socavando los márgenes provocando nuevos derrumbes laterales. Por el peligro que conlleva intentar subir a la cicatriz, las visitas de campo posteriores se han basado únicamente en la toma de imágenes desde la carretera para su análisis en diferentes aspectos.

3.4. Caracterización geológica y geotécnica

Según el informe del ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya 2018), se distinguen tres tipos de terreno involucrados en la zona del flujo:

- En superficie se encuentra una formación de origen coluvial, de espesor muy irregular (entre 50 cm i 5 m), constituida de clastos angulosos con origen en los mármoles topográficamente superiores.



Figura 8: Material coluvial con la humedad natural post-rotura (izquierda) y material seco y disgregado (derecha).

- Un depósito de origen glacial, de espesor también muy irregular (entre 1 y 5 m), formado por clastos de tamaño bloque y canto rodado en una matriz arenosa.



Figura 9: Material de origen glacial con la humedad natural post-rotura (izquierda) y material seco y disgregado (derecha).

- Por debajo de este depósito se observa, en la superficie de rotura y en el surco erosivo, el substrato rocoso formado por mármoles modelados por acción del glaciar que ocupaba estos valles. En la parte superior de la cicatriz se observa la roca con un ángulo de 56° y una surgencia de agua de origen kárstico que ha generado un torrente (Figura 10).



Figura 10: Detalle de la parte superior de la cicatriz de rotura donde se aprecia el substrato rocoso, la surgencia kárstica y el torrente que se forma.

En base a la información disponible y a medidas cartográficas tomadas por los técnicos del ICGC, se ha realizado un croquis de las dimensiones y de la situación previa y posterior al deslizamiento (Figura 11). Esta representación gráfica no muestra los distintos materiales mencionados anteriormente por la irregularidad de las capas, sin embargo, sí que se representa el substrato rocoso de manera cualitativa, ya que no es posible determinar la profundidad a la que se encuentra sin una campaña de ensayos de campo.

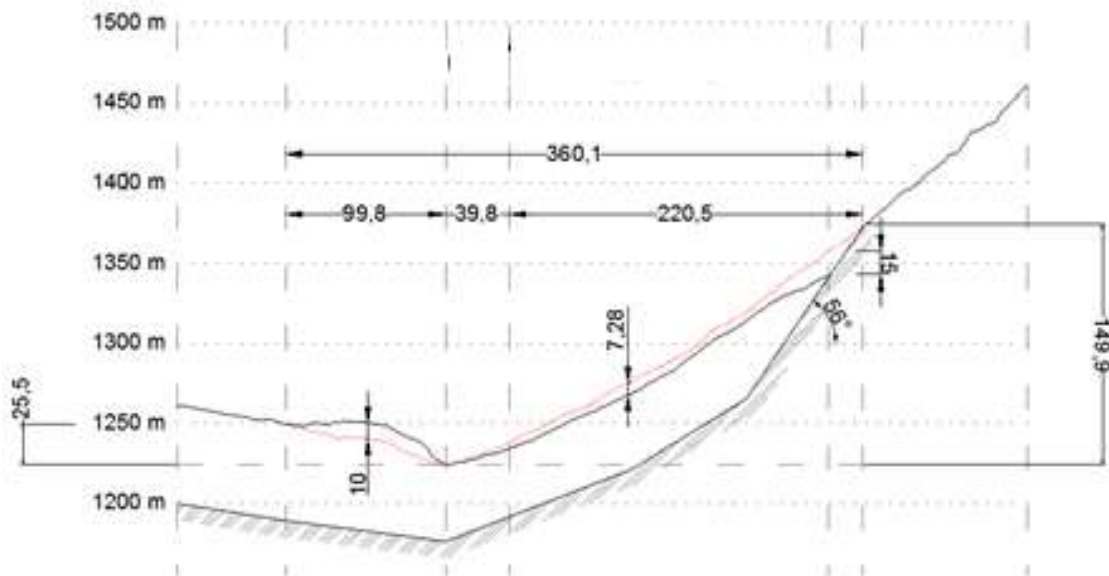


Figura 11: Topografía previa (línea roja) y posterior (línea negra) al flujo producido en mayo de 2018.

Con toda esta información y las muestras tomadas en campo del material glaciar y del material coluvial se decide realizar una serie de ensayos de laboratorio para determinar los parámetros característicos del terreno.

En primer lugar, se realiza una caracterización granulométrica y los límites de Atterberg para clasificar el suelo. Posteriormente se realizan ensayos de corte anular para determinar las características resistentes del terreno (ángulo de rozamiento residual).

3.5. Trabajo de laboratorio

En la Figura 12 se muestra la distribución granulométrica y los límites de Atterberg de ambas muestras. El material glacial, que se encuentra a mayor profundidad, tiene la fracción gruesa de un tamaño mayor que el material coluvial, mientras que para la fracción fina sucede al contrario. En cuanto a los límites de Atterberg, estos son menores en el material glacial que en el coluvial, si bien, los índices plásticos de ambos materiales son similares.

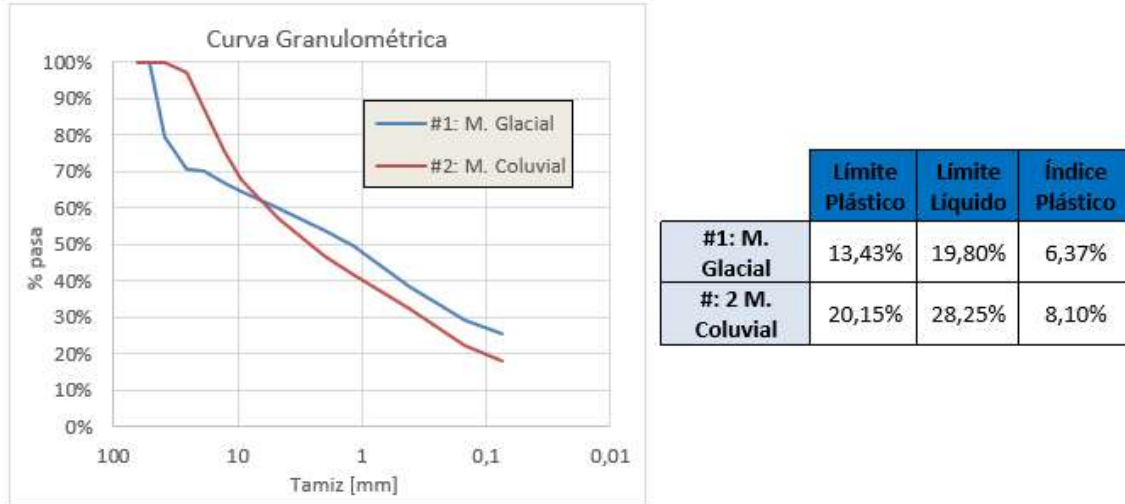


Figura 12: Curva granulométrica y tabla resumen de los límites de Atterberg para ambas muestras involucradas en la rotura.

Como resultado de estos ensayos se puede clasificar ambos suelos como arenas arcillosas (SC) según el Sistema unificado de Clasificación de Suelos (American Society for Testing and Materials 1985).

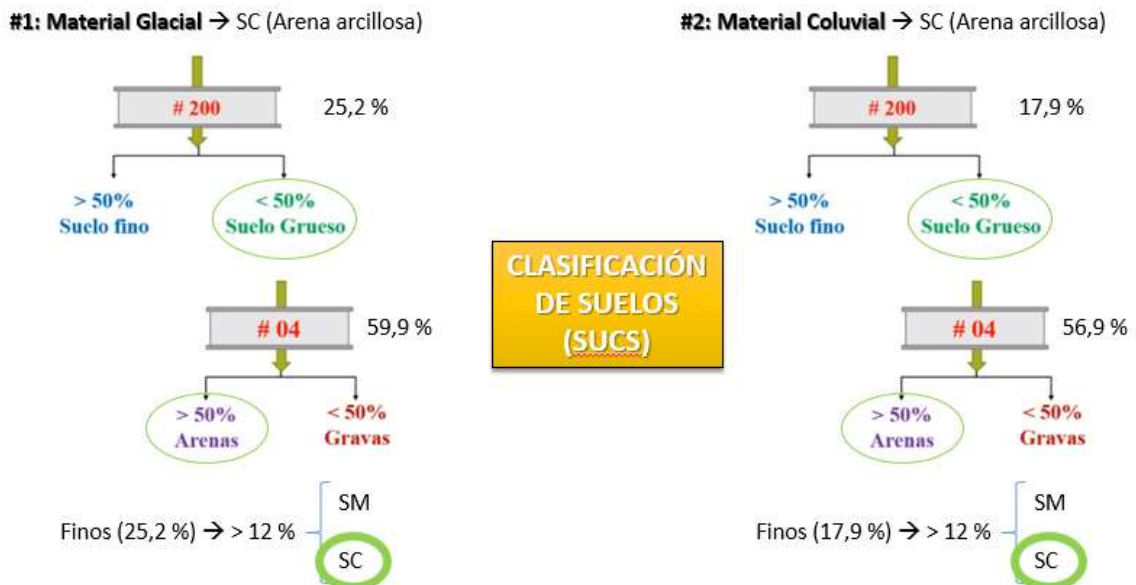


Figura 13: Clasificación de ambos suelos según Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Para determinar las características mecánicas de ambas muestras se han realizado ensayos de corte anular en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela de Caminos de Barcelona.

En un ensayo de corte anular se confina la muestra en condiciones edométricas bajo una carga vertical y, tras dejar pasar un tiempo suficiente para que se produzca la consolidación, se aplica la carga de corte midiendo el desplazamiento vertical de la muestra. Este proceso se reproduce bajo tres escalones de carga (50, 100 y 200 kPa por razones prácticas en el laboratorio) para obtener puntos σ - τ (tensión normal y tangencial) de rotura y así determinar una envolvente de rotura de tipo Mohr-Coulomb. En el caso del material a analizar se realizan en condiciones drenadas, suponiendo por el tipo de material que no se generan sobrepresiones debido al flujo de agua en el proceso de carga.

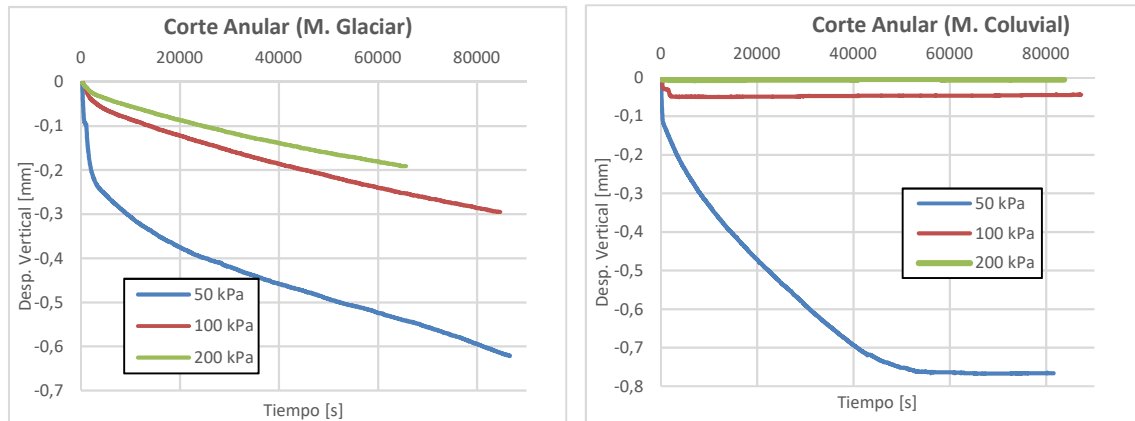


Figura 14: Consolidación de las muestras bajo los distintos escalones de carga.

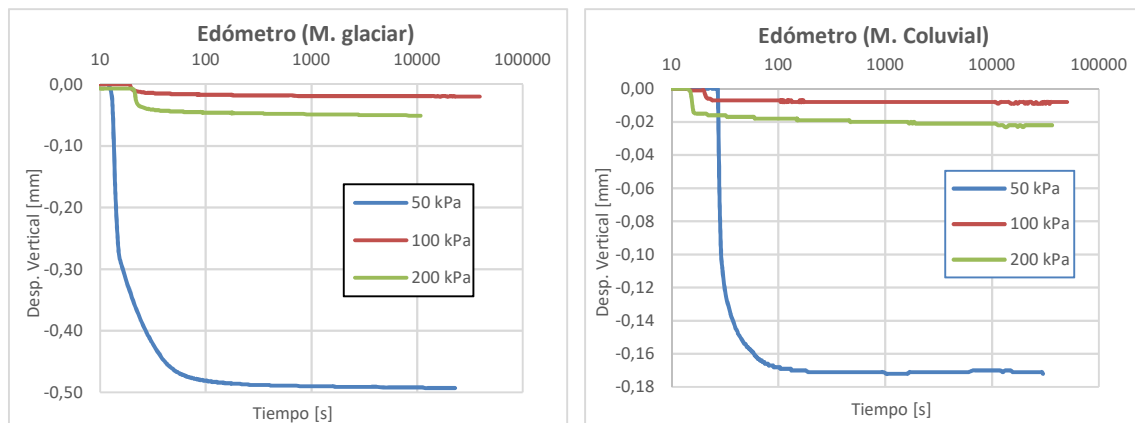


Figura 15: Deformación de las muestras bajo el proceso de corte anular para los distintos escalones de carga.

Con las células de carga instaladas en la máquina de corte y las características geométricas de la muestra se puede obtener la tensión tangencial media y graficarla en relación al desplazamiento vertical medido (Figura 16). En este gráfico podemos interpretar el punto de rotura de la muestra para cada caso de carga vertical.

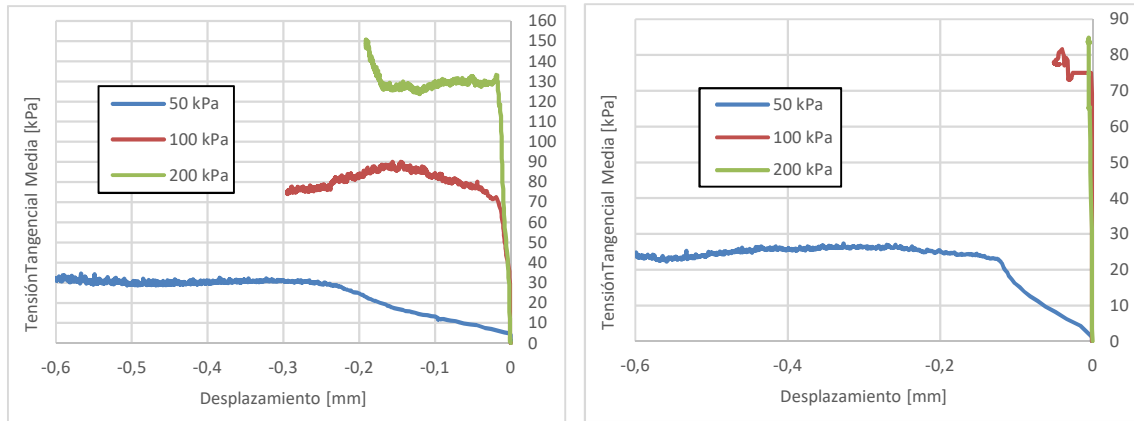


Figura 16: Gráfico tensión tangencial-desplazamiento vertical en el que se puede apreciar el punto de rotura para los distintos escalones de carga en cada muestra.

Situando los puntos de tensión tangencial de rotura respecto a su tensión vertical aplicada se obtiene la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb mediante un ajuste lineal (Figura 17). En la muestra del material coluvial se ha descartado el último punto con la carga vertical de 200 kPa ya que muestra un comportamiento anómalo en el proceso de carga de corte anular (Figura 16) y se sale notablemente de la tendencia de la envolvente de rotura.

Al tratarse de un ensayo de corte anular con terreno remoldado, se obtienen parámetros resistentes residuales y con cohesión nula. Por esta razón, se ajustan las envolventes de rotura al origen de coordenadas, obteniéndose un valor de ángulo de rozamiento interno muy similar en ambas muestras con un valor de unos de unos 33° .

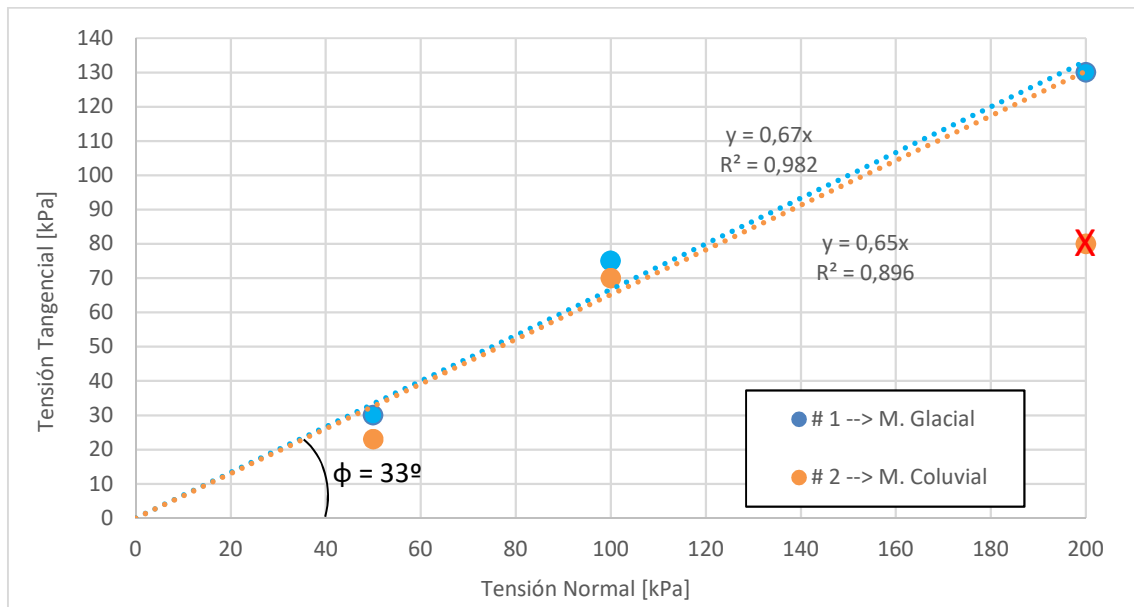


Figura 17: Envolvente de rotura Mohr-Coulomb para ambas muestras de suelo.

4. MODELIZACIÓN ESTÁTICA DEL DESLIZAMIENTO

4.1. Software utilizado

Para realizar el modelo estático previo se ha empleado el software Slide 2018 (Rocscience 2002). Este es un programa para estudiar la estabilidad de taludes bidimensionales mediante el método del equilibrio límite. Es decir, el programa busca para un determinado problema los mecanismos de rotura cinemáticamente admisibles y proporciona el factor de seguridad asociado a cada uno. Se pretende obtener los parámetros resistentes bajo distintas hipótesis tales que el factor de seguridad sea igual a la unidad y así determinar los parámetros resistentes críticos para la estabilidad de la ladera.

4.2. Modelo estático

La geometría del modelo estático es la que se muestra en la Figura 18. Es una geometría simplificada con las pendientes medias de las laderas. En lo que se refiere a los materiales se diferencia el lecho rocoso, definido como un material de infinita resistencia, de los materiales granulares superficiales en los que se emplea un criterio de Mohr-Coulomb.

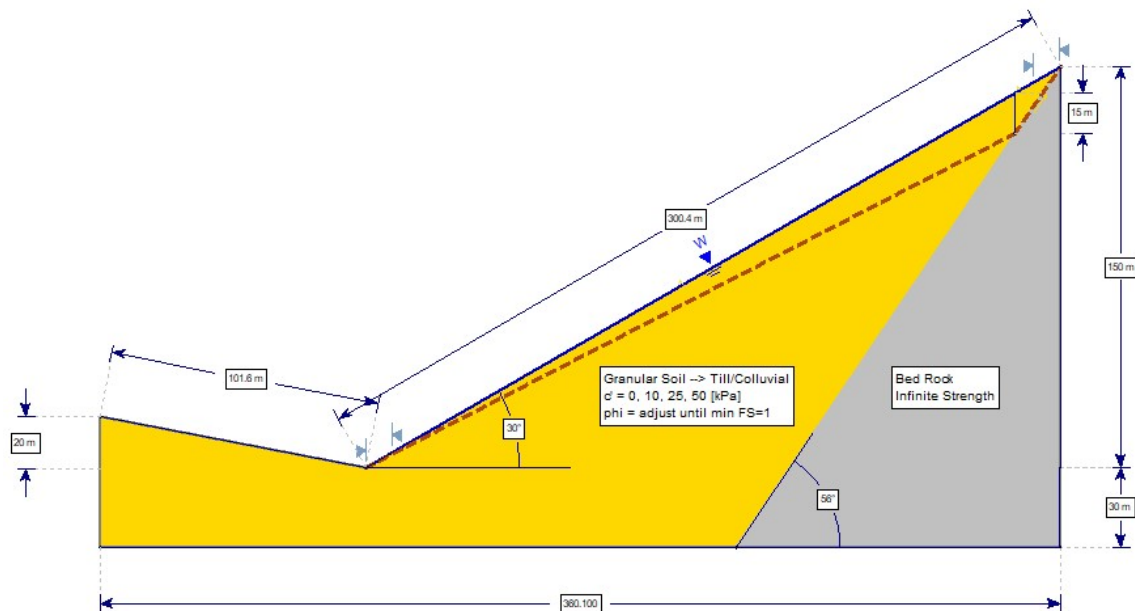


Figura 18: Geometría y materiales empleados en el modelo estático de equilibrio límite.

Al tratarse de un problema en el que se conoce la geometría post-rotura se juega con este hecho para determinar las condiciones de nivel freático y propiedades del material. Se impone al modelo una zona de inicio y fin del mecanismo para intentar reproducir las circunstancias reales. El programa permite, además de buscar superficies de rotura circulares, la definición de una capa débil con las mismas propiedades resistentes que el material granular. Esta es una de las hipótesis de cálculo que se han empleado. La otra hipótesis que se ha tenido en cuenta está relacionada con la posición del nivel freático.

Se han ejecutado cálculos del modelo estático con superficies circulares y con capa débil coincidente con la superficie de rotura bajo distintas hipótesis de posición del nivel freático en el punto más alto de la superficie de rotura y manteniéndolo constante en el pie del deslizamiento con el nivel del río.

4.3. Resultados

El procedimiento de cálculo seguido bajo cada hipótesis considerada ha sido el mismo; para distintos valores de cohesión (0, 10, 25 y 50 kPa) se ha ido variando el ángulo de rozamiento hasta que el mecanismo de rotura más desfavorable tenga un factor de seguridad (FS) igual a la unidad.

De esta forma se obtienen resultados como los que se muestra en la Figura 19 y se puede representar gráficamente las curvas de FS igual a uno para las distintas hipótesis (Figura 20 y Figura 21).

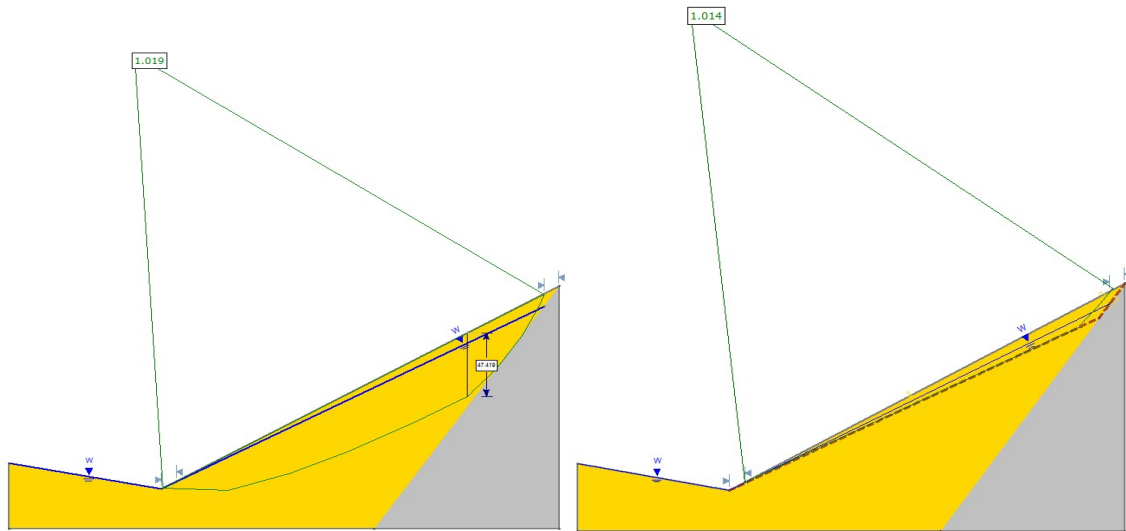


Figura 19: Ejemplo de resultados del modelo estático para cada una de las hipótesis propuestas con cohesión 25 kPa.

En los casos en que se emplean superficies de rotura circulares, estas son notablemente más profundas que las observadas en la cartografía del deslizamiento. Esto se solventa aplicando la capa débil con la geometría aproximada de la rotura observada.

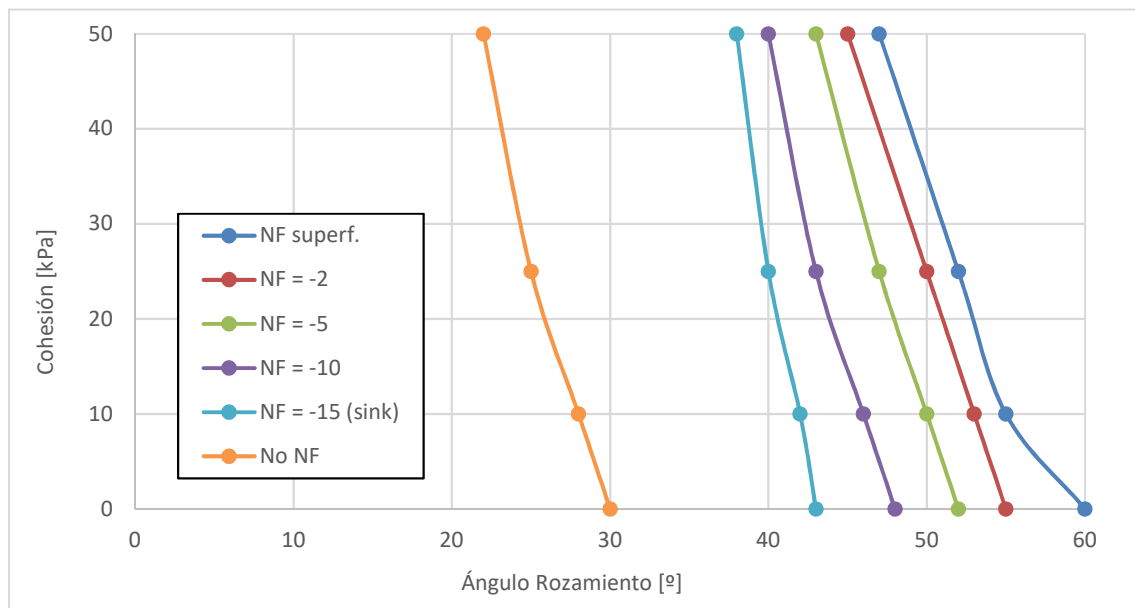


Figura 20: Curvas FS=1 para distintas hipótesis de posición de NF con superficies de rotura circulares.

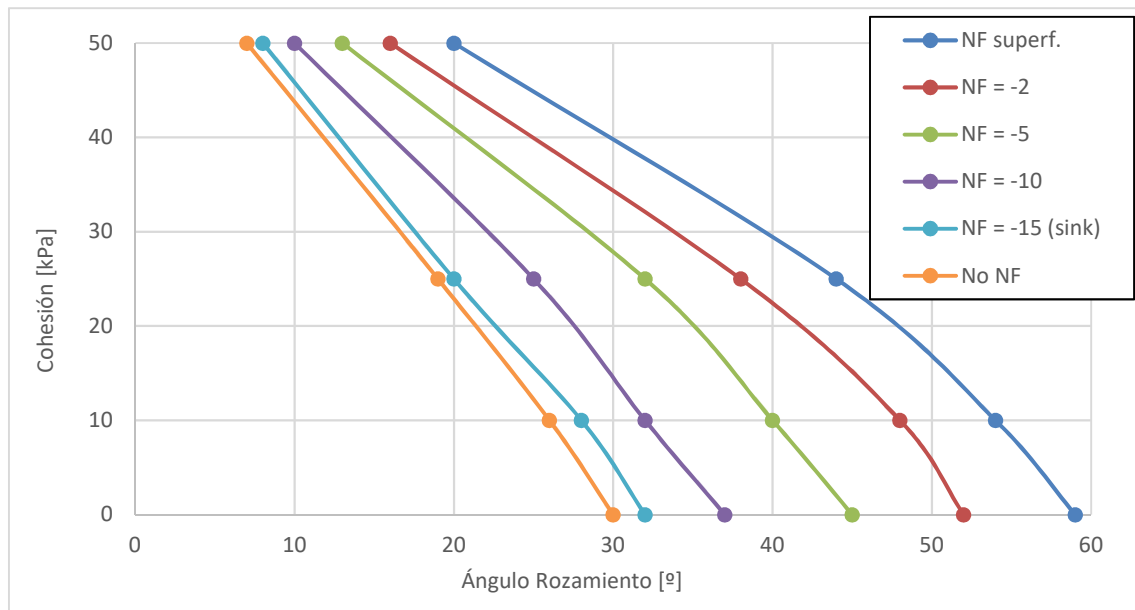


Figura 21: Curvas FS=1 para distintas hipótesis de posición de NF con capa débil coincidente con superficie de rotura.

Al mirar los resultados en el gráfico de curvas de FS unitario, vemos como se observan dos tendencias diferenciadas al aplicar o no la capa débil y variar los parámetros resistentes. En el caso de superficies de rotura circulares arbitrarias se obtienen valores críticos más altos y profundidades de rotura mayores que en el caso de la capa débil.

Los resultados obtenidos en el ensayo de corte anular en ambos materiales (cohesión residual nula y ángulo de fricción residual sobre los 35°) podrían corresponder con lo obtenido en el modelo estático para los casos en que el NF se encuentra dentro del terreno movilizado. Con las condiciones residuales post-rotura del terreno, este sería inestable teniendo en cuenta la geometría inicial bajo todas las hipótesis de posición del nivel freático con excepción del caso seco.

5. MODELIZACIÓN DINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO

5.1. Software utilizado

El software utilizado en la modelización dinámica tiene el nombre comercial Anura 3D y ha sido desarrollado por la “Anura 3D MPM Research Community” (MPM Research Community 2017a, 2017b), resultado de una colaboración internacional de universidades y centros de investigación en modelos numéricos que trata de desarrollar software con formulación basada en el MPM.

Para la entrada de datos del modelo (geometría, materiales, condiciones de contorno y mallado) se emplea el software de pre-proceso GiD (www.gidhome.com), el cual genera archivos para que Anura realice el cálculo y los resultados se visualizan con el software de post-proceso ParaView (www.paraview.org).

En la versión más reciente disponible a fecha de la realización de esta tesis, Anura3D v.2017.2, el software permite hacer modelos tridimensionales con una formulación MPM dinámica y explícita, capaz de simular materiales con 1 y 2 fases y superficies libres de agua. Mediante un enfoque de formulación hidro-mecánica acoplada se puede modelar la interacción entre suelo y agua en medio poroso saturado.

En futuras versiones en las cuáles se está trabajando actualmente se pretende implementar la posibilidad de hacer modelos bidimensionales y simular tres fases materiales para trabajar con medio poroso no saturado.

5.2. Geometría inicial

La geometría inicial empleada en el modelo es la que se muestra en la Figura 22.

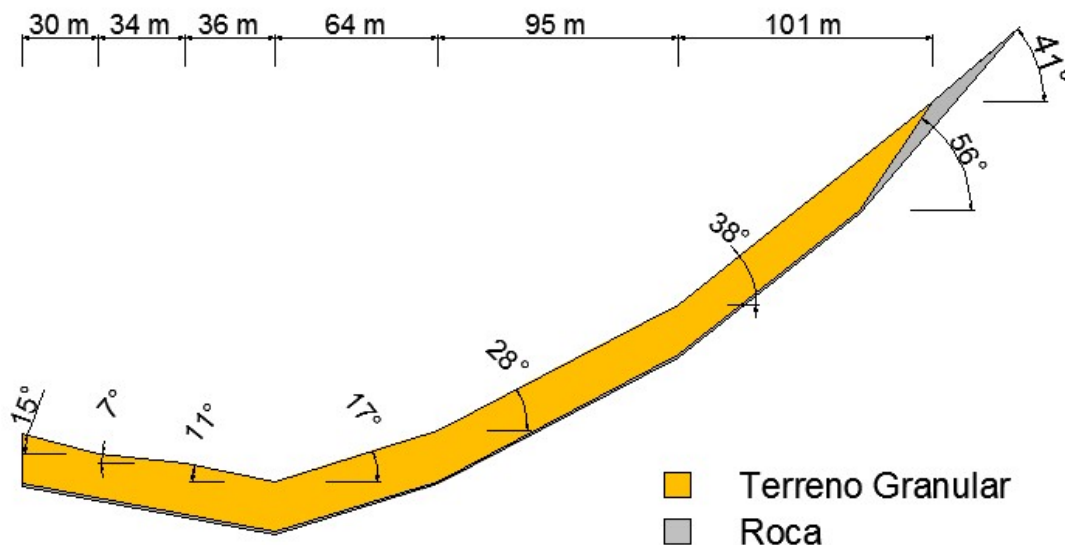


Figura 22: Geometría y materiales empleados en el modelo.

Las medidas geométricas son acordes con lo observado en la cartografía de superficie pre y post-rotura. Al no tener datos de la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso se ha situado a una profundidad arbitraria de 20 metros bajo la superficie.

Pese a ser un problema eminentemente tridimensional por la forma del flujo, la dificultad, incertidumbre y coste computacional que implicaría tal cálculo hacen muy complicado su implementación práctica. Por lo tanto, se ha decidido realizar un modelo con hipótesis de deformación plana, pero como la versión de Anura 3D que permite realizar dichos cálculos todavía no se encuentra disponible se ha realizado un modelo 3D de espesor 1 metro.

5.3. Materiales

En lo que se refiere a los materiales, debido a la irregularidad de las capas depositadas sobre el lecho rocoso (material glacial y coluvial) estos no se diferencian y en el modelo son un mismo material. Como se ha visto en los análisis realizados en el laboratorio, ambos materiales tienen características mecánicas similares.

El código Anura3D permite modelizar medio poroso seco o saturado. En los casos saturados se pueden definir condiciones drenadas, condiciones no drenadas en tensiones efectivas o totales, condiciones no drenadas en problema hidro-mecánico acoplado y, también, se puede simular materiales líquidos. En lo que refiere a modelos constitutivos materiales, el código tiene la capacidad de emplear la teoría de elasticidad lineal, el modelo de Mohr-Coulomb con y sin hipótesis de reblandecimiento y el modelo Cam-Clay modificado, además de la posibilidad de definir un modelo material por el usuario.

En el ámbito de esta tesis, se emplea la teoría elastoplástica como modelo constitutivo para el lecho rocoso, mientras que para el terreno granular se utiliza el modelo Mohr-Coulomb con y sin la hipótesis de reblandecimiento.

A continuación, se expone y justifica los diferentes parámetros materiales empleados posteriormente en los modelos numéricos (Tabla 4 y

Tabla 5):

Tabla 4: Propiedades básicas de la fase sólida y líquida.

Material	Lecho rocoso	Terreno granular (glacial + coluvial)
Porosidad	0,1	0,25
Densidad sólida	2800 kg/m ³	2650 kg/m ³
Densidad líquido	1000 kg/m ³	

Tabla 5: Propiedades referentes a los modelos constitutivos materiales.

Material	Lecho rocoso	Terreno granular (glacial + coluvial)	
Modelo Material Sólido	Elasticidad lineal	Mohr-Coulomb	MC con reblandecimiento
Poisson Ratio	0,33	0,33	0,33
Módulo de Young	150000 kPa	15000 kPa	
Cohesión	-	c	c = 33 → 0 kPa
Ángulo de fricción	-	33 ° (lab)	$\phi_{PICO} = 33^\circ$ $\phi_{RESIDUAL}$
Ángulo de dilatancia	-	0 °	0 °

Factor de forma	-	-	500
------------------------	---	---	-----

Los parámetros de porosidad, densidad sólida, coeficiente de Poisson y módulo de Young se han definido dentro de un rango de valores admisibles para los materiales en cuestión.

Cabe destacar que el lecho rocoso tiene un módulo de rigidez diez veces mayor al del terreno granular. La finalidad de dichos valores era definir el substrato rocoso como un estrato de alta rigidez respecto al material granular sin incrementar el coste computacional de los cálculos, que se veía afectado si se disponía de rigideces muy altas del lecho rocoso.

Los parámetros relacionados con los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb se variarán en función de las diferentes casuísticas a analizar, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en laboratorio y el comportamiento observado en el campo. En el siguiente capítulo (*cap. 6: Resultados*), se explica razonadamente la elección de cada parámetro para las diferentes hipótesis consideradas.

5.4. Condiciones de contorno

Restricciones cinemáticas

Las condiciones de contorno del modelo se pueden visualizar en la Figura 23. Para realizar un modelo bidimensional de deformación plana a partir de un modelo tridimensional se ha de aplicar restricción cinemática en el eje transversal (eje z), en el que se supone que no habrá desplazamientos ni tensiones por las hipótesis de deformación plana. En los límites laterales e inferior del modelo (terreno rocoso y límite en ladera opuesta) se aplican restricciones en los ejes x e y según la orientación de las líneas.

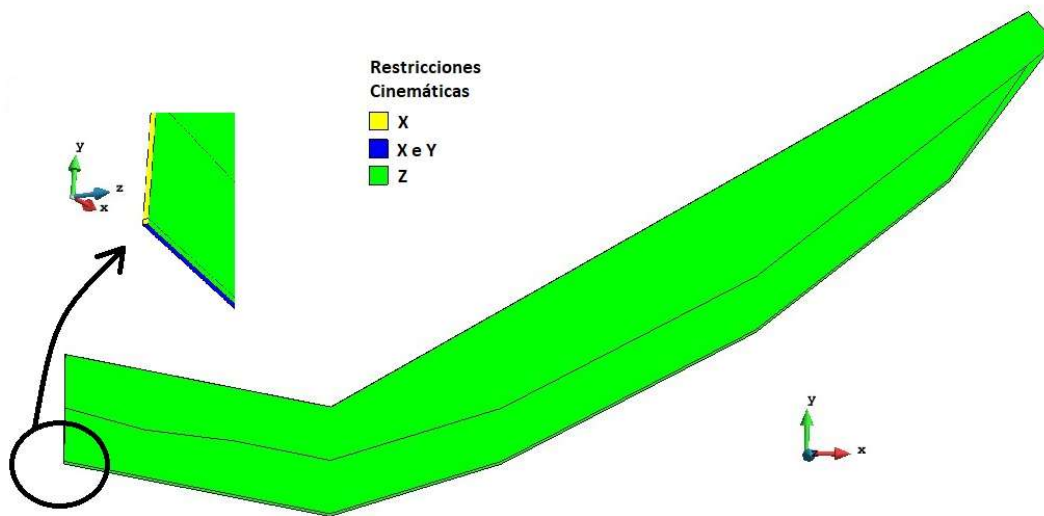


Figura 23: Restricciones cinemáticas aplicadas en el modelo.

En el caso de realizar modelos en que se tenga que tener en cuenta el agua, se pueden definir también superficies impermeables.

5.5. Mallado y puntos materiales

Al tratarse de un modelo tridimensional que pretende simular un problema bidimensional con deformación plana, en el mallado se emplean elementos tetraédricos con una organización semiestructurada en el eje z, de manera que en el espesor de la laja de terreno (de 1 m) se tenga un único elemento.

La malla se extiende más allá del dominio material para que cuando se movilice el terreno, se tenga un dominio discretizado a través del que moverse. Los elementos que no tienen puntos materiales en un determinado paso de tiempo son elementos no activos, por lo tanto, no incrementan los tiempos computacionales.

En cuanto al dominio material, formado por los dos tipos de terreno (roca y material granular), se discretiza en puntos materiales en los que se almacena la información relevante. En el modelo se designa el número de puntos materiales que habrá por cada elemento de la malla, y, al tratarse de elementos tetraédricos, el número de puntos materiales puede ser 1, 4, 10... En el modelo se ha decidido emplear un punto material por elemento para así controlar la densidad de puntos mediante la definición de la malla euleriana.

Tras varias pruebas y teniendo en cuenta la precisión de los resultados y el coste computacional de los cálculos, se ha decidido emplear elementos con un tamaño de 5 m de lado, obteniendo la malla con las características descritas en la Figura 24.

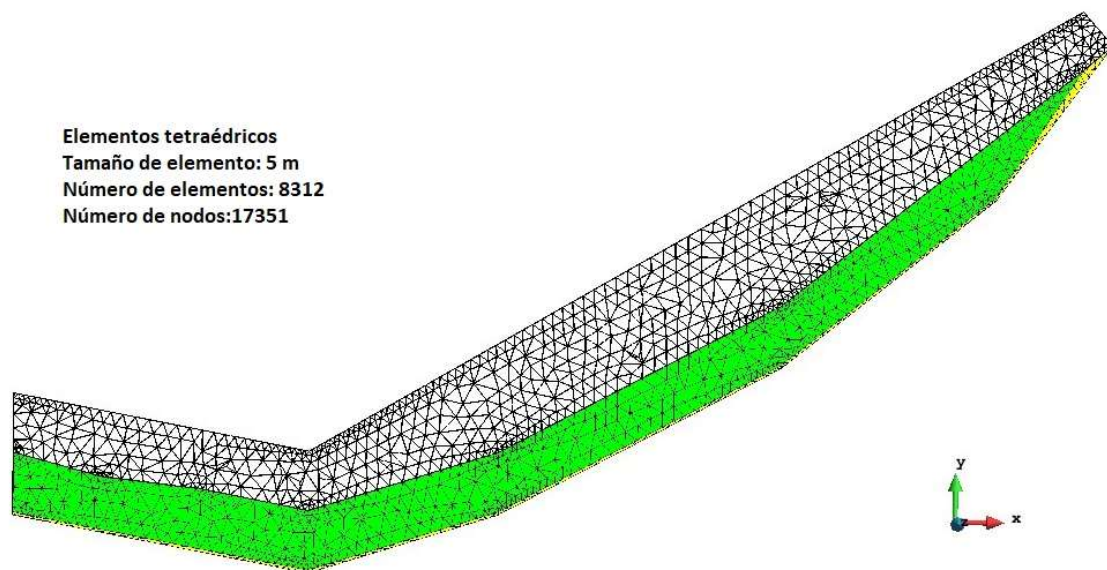


Figura 24: Características de la malla euleriana empleada en los cálculos.

5.6. Esquema de cálculo

Los cálculos realizados se dividen en tres fases para simular la historia previa del material y el comportamiento pre y post rotura:

Tabla 6: Esquema de cálculo empleado en el modelo MPM.

	Carga gravitatoria	Presión de agua	Resistencia Terreno
Fase Inicial (5 s)	Incremento lineal de 0 a 9'8 veces la densidad material (δ)	Incremento lineal	$\phi = 33^\circ$ $C = 30 \text{ kPa}$
Fase de Desestabilización (5 s)	100 % carga gravitatoria	100 % presión de agua	Caída gradual de la cohesión hasta desencadenar flujo
Fase de Transporte (40 s)	100 % carga gravitatoria	100 % presión de agua	$\phi_{\text{PICO}} = 33^\circ$ (ϕ_{RESIDUAL}) $C \approx 0 \text{ kPa}$

Fase Inicial

La fase inicial pretende simular la historia previa del material, valorando y comparando las tensiones iniciales y las presiones de agua existentes en el terreno al final de esta fase. Al no disponer de los parámetros pico, se le asigna al material el ángulo de fricción obtenido en el laboratorio ($\phi = 33^\circ$) y una cohesión arbitraria que asegura la estabilidad de la ladera.

Fase de Desestabilización

En la fase de desestabilización se simula artificialmente el desencadenamiento del flujo provocando una disminución de la cohesión hasta un valor residual. Este paso se podría interpretar como una saturación repentina del terreno, produciendo una disminución de la resistencia que desencadena en el inicio del movimiento en la ladera, siendo la hipótesis más probable dadas las lluvias y la surgencia kárstica observadas en el terreno.

Fase de Transporte

Por último, en la fase de transporte se analizará la evolución cinemática del deslizamiento: geometría de la rotura, alcance, velocidades... Es probable que, durante esta fase, el material experimentara una pérdida importante de la resistencia debido a efectos termo-hidro-mecánicos, llegando a un posible estado de licuefacción. Estos fenómenos, difíciles de plasmar en un modelo numérico, y que no se pueden tener en cuenta en un modelo en seco, se pretenden simular de forma artificial definiendo el terreno granular con un modelo material Mohr-Coulomb con reblandecimiento y buscando el ángulo de fricción residual que produzca los efectos dinámicos observados. De esta manera se simula la probable pérdida de resistencia del material durante el flujo, propiciando las altas velocidades y el alcance observados.

6. RESULTADOS

En el presente capítulo se detalla razonadamente la elección de las hipótesis a tener en cuenta a la hora de modelar los distintos casos. También se exponen y analizan los resultados obtenidos.

6.1. Caso base: Material seco y modelo constitutivo Mohr-Coulomb

Como se comenta anteriormente, el substrato rocoso se modela como un material elástico y el terreno granular con un modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. En primer lugar, se realizará un modelo en seco, que será útil como punto de partida, en la comprobación de las condiciones de contorno y para calibrar ciertos parámetros materiales.

La principal incertidumbre deriva del desconocimiento de los parámetros resistentes del material granular previos a la rotura. También se desconoce el comportamiento del nivel freático y las presiones intersticiales, aunque la hipótesis más fiable es que un incremento del nivel freático en la ladera fuera el desencadenante del deslizamiento.

Para modelar el terreno granular se decide emplear el ángulo de fricción obtenido en el laboratorio ($\phi = 33^\circ$), pese a estar relacionado con el comportamiento residual post-rotura del material. Para asegurar la estabilidad de la ladera en la fase inicial, en la que se aplica linealmente la gravedad para simular la historia previa del material, se le da una cohesión arbitraria al modelo. Este valor se ha determinado mediante un ensayo de prueba y error; al aplicar la gravedad se obtiene un cierto desplazamiento en la parte superior de la ladera (Figura 25), que tiene mayor pendiente. Este desplazamiento disminuye con el aumento de la cohesión de la siguiente manera (Figura 26):

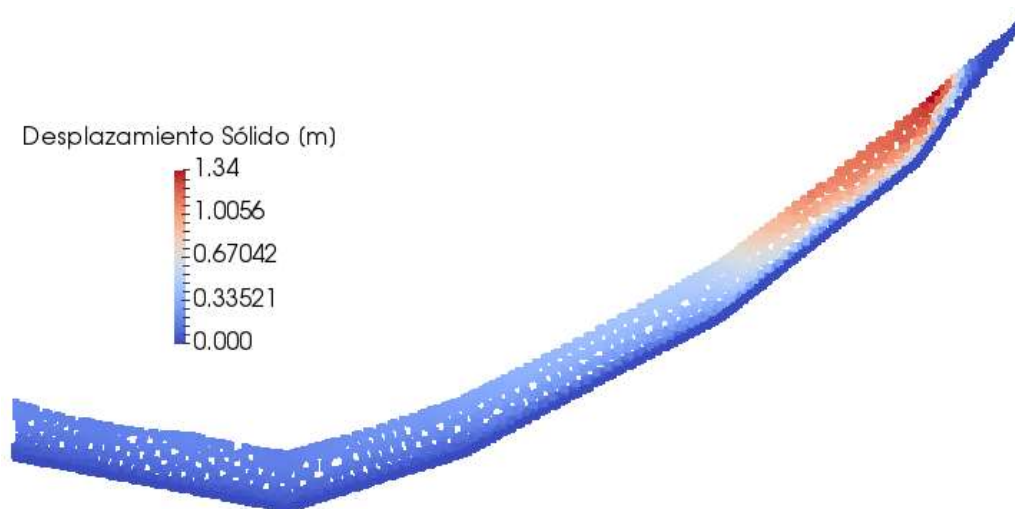
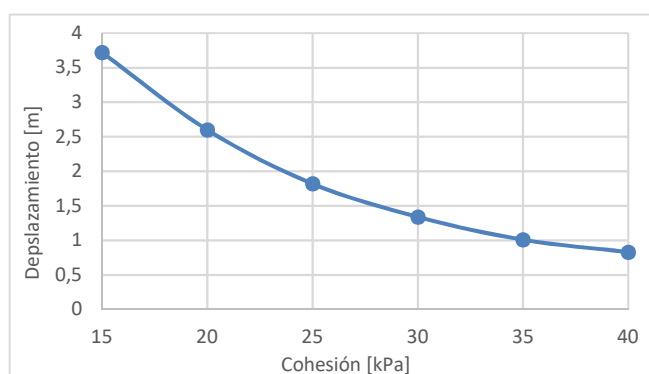


Figura 25: Desplazamiento obtenido en la parte superior de la ladera tras la fase de inicio con cohesión 30 kPa.



Cohesión	Desplazamiento
15 kPa	3,72 m
20 kPa	2,60 m
25 kPa	1,82 m
30 kPa	1,34 m
35 kPa	1,01 m
40 kPa	0,83 m

Figura 26: Desplazamiento obtenido en la parte superior de la cicatriz después de la fase de inicio bajo distintas hipótesis de cohesión.

Teniendo en cuenta este comportamiento, se decide emplear una cohesión pre-rotura de 30 kPa, además del ángulo de fricción obtenido en laboratorio.

El siguiente paso es simular el desencadenamiento del flujo. Para ello, se simula artificialmente un proceso de mojado con pérdida de cohesión hasta valores nulos, de manera que el terreno pasa a tener al final de esta fase la resistencia post-rotura obtenida en el laboratorio ($\phi = 33^\circ$ y $c = 0$ kPa). Con estos parámetros resistentes debería iniciarse el movimiento en la ladera, por lo tanto, la última fase consiste en correr la simulación durante un tiempo para observar la dinámica del flujo.

Este caso es útil para evaluar el estado tensional del terreno al final de la fase inicial y sirve de primera aproximación en lo que se refiere a la dinámica del flujo. A continuación, se entra en detalle en los resultados obtenidos.

- Tensiones Iniciales

La Figura 27 muestra gráficamente el estado tensional en el terreno después de la fase inicial en la que se aplica de forma lineal la carga gravitatoria. Al ser un terreno seco y no existir presiones de agua, las tensiones totales y las efectivas son iguales.

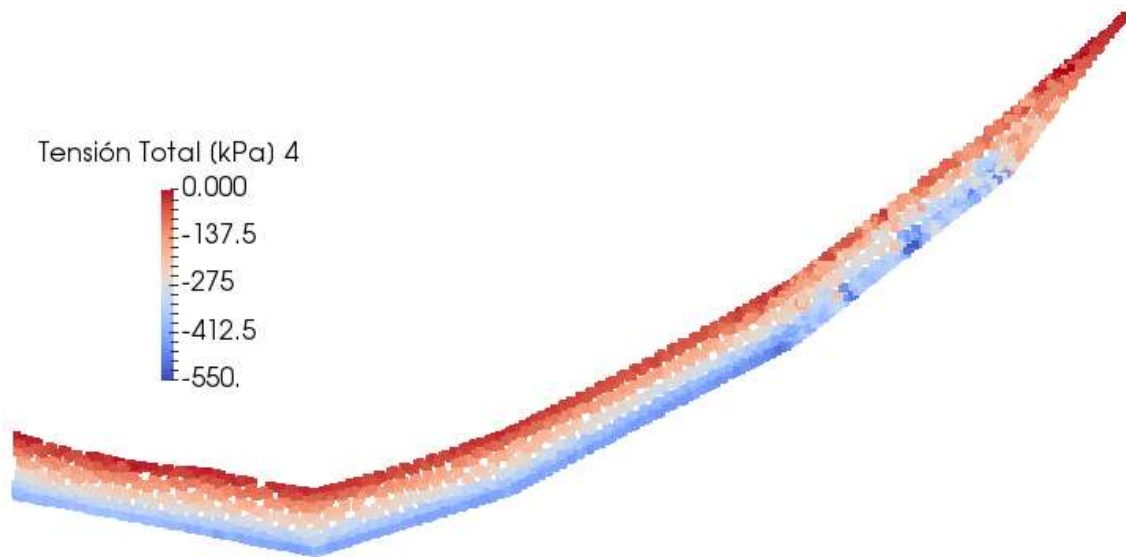


Figura 27: Tensión vertical total [kPa] tras la fase de inicio en el caso seco y MC estándar.

La tensión vertical es nula en la superficie y crece con la profundidad. Analíticamente se podría obtener el estado tensional de los puntos en función de su profundidad, dado que la densidad del material es conocida (2650 kg/m^3) y constante en todo el dominio. La tensión vertical en el fondo del valle a 20 metros de profundidad sería entonces de unos $\sigma'_V = \sigma_V = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 20 \text{ m} = 519,4 \text{ kPa}$, del orden del obtenido en el modelo tras la fase de inicio.

- Geometría de la superficie de rotura

En la Figura 28 podemos ver como la superficie de rotura tiene una forma similar en la parte superior de la ladera, pero, en cuanto al recorrido del flujo, este es menor que en la realidad ya que el material no llega ni siquiera al fondo del valle, en los 30 segundos de simulación. Este resultado era de esperar dado que se trata del caso seco, y que por tanto no se tiene en cuenta el potencial desestabilizador que seguro jugó el agua en el flujo ocurrido.

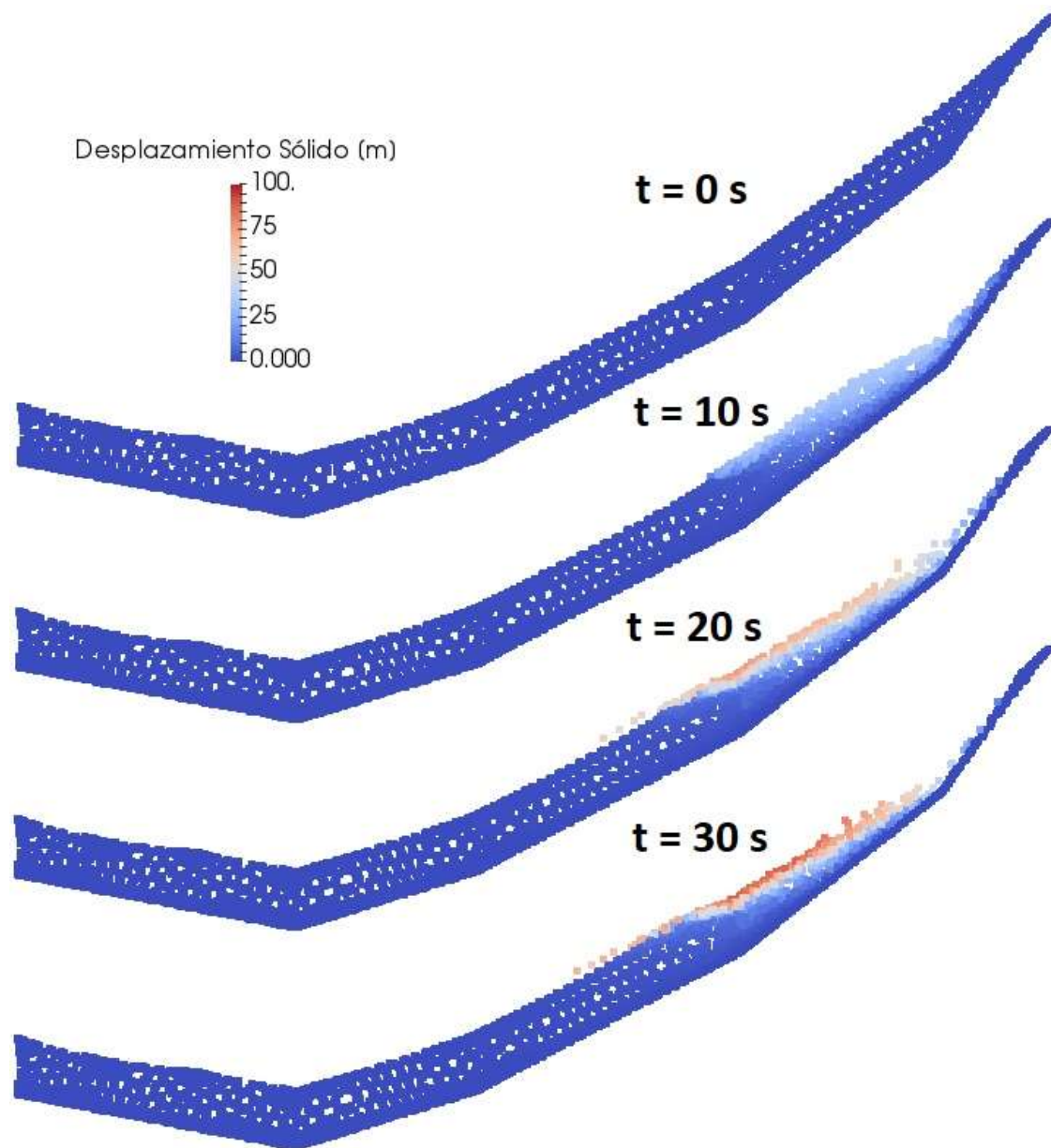


Figura 28: Evolución del flujo en la ladera para el caso seco y MC estándar.

6.2. Variante 1: Material seco y modelo constitutivo Mohr-Coulomb con reblandecimiento

Dado que con el caso base no se logra reproducir la dinámica observada en el deslizamiento, se introduce un nuevo concepto en el modelo: la caída de resistencia en función del esfuerzo al que se somete el terreno.

Los materiales frágiles como los terrenos arcillosos sobre-consolidados y cementados, como podría ser el de la ladera estudiada en esta tesis, exhiben un fenómeno de reblandecimiento posterior a un valor pico de resistencia al corte al incrementarse las deformaciones tangenciales. Esta reducción de resistencia puntual puede propagarse generando un proceso de rotura progresiva, el cuál puede propiciar la aceleración de un deslizamiento (Yerro 2015).

En este apartado, se pretende realizar una variación del caso base para reproducir el fenómeno explicado anteriormente. Para ello, se procede a cambiar el modelo constitutivo del material granular a un Mohr-Coulomb con reblandecimiento, de manera que el ángulo de fricción depende de la tensión tangencial y la aceleración de las partículas. Se realizan los mismos pasos que en el modelo anterior: fase de inicio con parámetros resistentes que aseguran la estabilidad de la ladera, desencadenamiento por pérdida de cohesión del material resultando en parámetros resistentes obtenidos en el laboratorio y fase de transporte con la novedad que se asigna un ángulo de fricción residual que depende de los parámetros dinámicos del flujo.

Para modelizar el comportamiento post-pico, en el código Anura se debe introducir un parámetro llamado factor de forma (η). La Figura 29 muestra los resultados de un ensayo de corte numérico en función del factor de forma (Yerro 2015). Se puede observar como factores de forma altos producen una degradación de la resistencia del material más veloz.

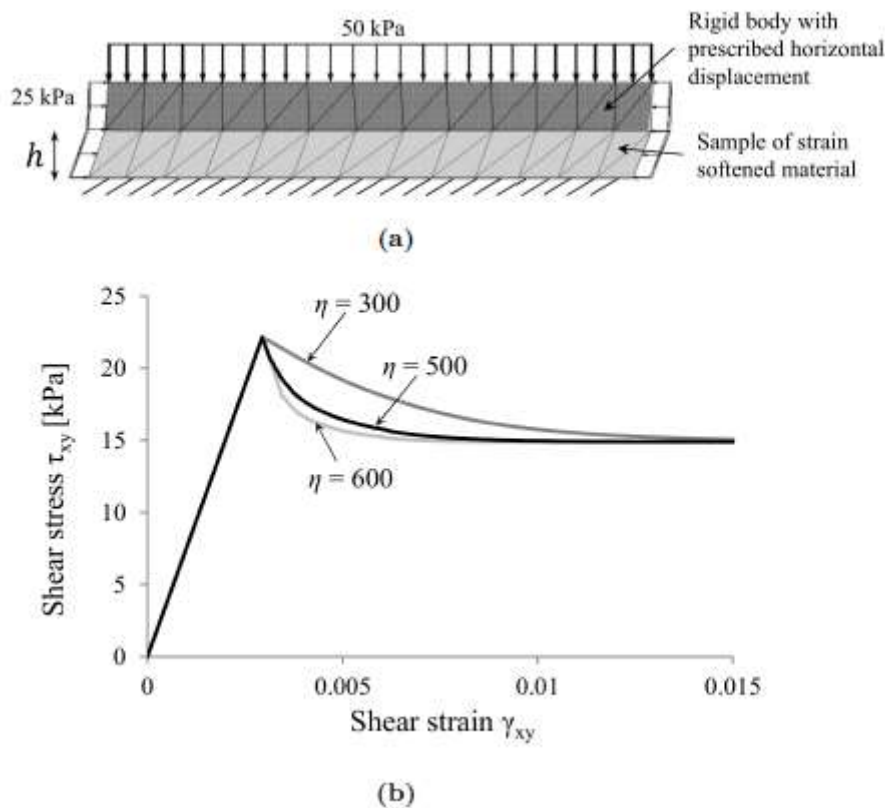


Figura 29: Esquema de un ensayo de corte numérico variando el factor de forma (Yerro 2015).

El estado tensional al final de la fase de inicio es el mismo que en el caso base, por lo tanto, la única diferencia está en los efectos dinámicos del deslizamiento, que dependerán del ángulo de fricción que se emplee.

- **Geometría de la superficie de rotura**

A continuación, se muestra los resultados obtenidos para distintos ángulos de resistencia residual:

- $\phi_{PICO} = 33^\circ$; $\phi_{RESIDUAL} = 20^\circ$

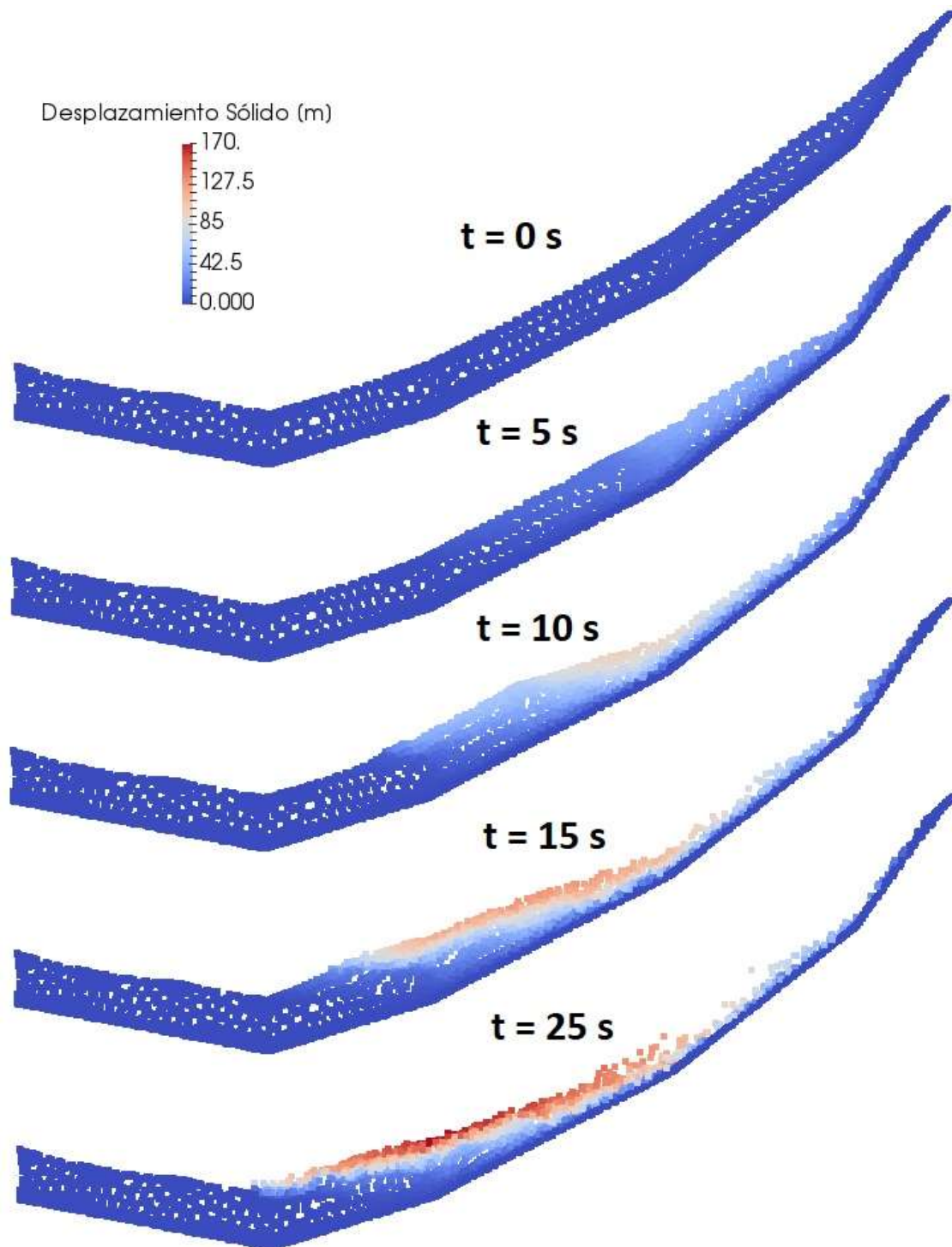


Figura 30: Evolución del flujo para el caso seco, MC con reblandecimiento y ángulo de fricción residual de 20° .

- $\phi_{PICO} = 33^\circ$; $\phi_{RESIDUAL} = 10^\circ$

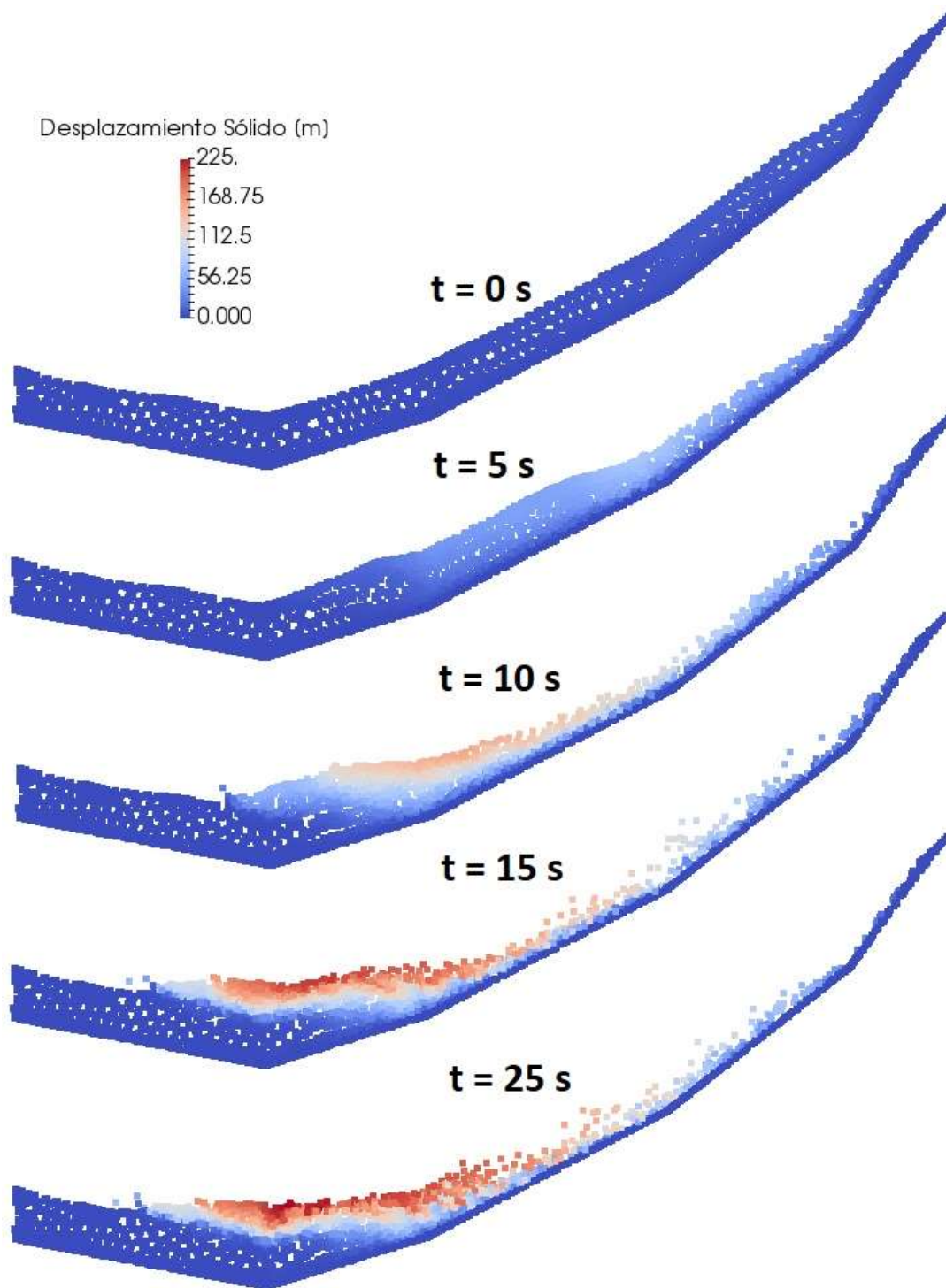


Figura 31: Evolución del flujo para el caso seco, MC con reblandecimiento y ángulo de fricción residual de 10° .

- $\phi_{PICO} = 33^\circ$; $\phi_{RESIDUAL} = 5^\circ$

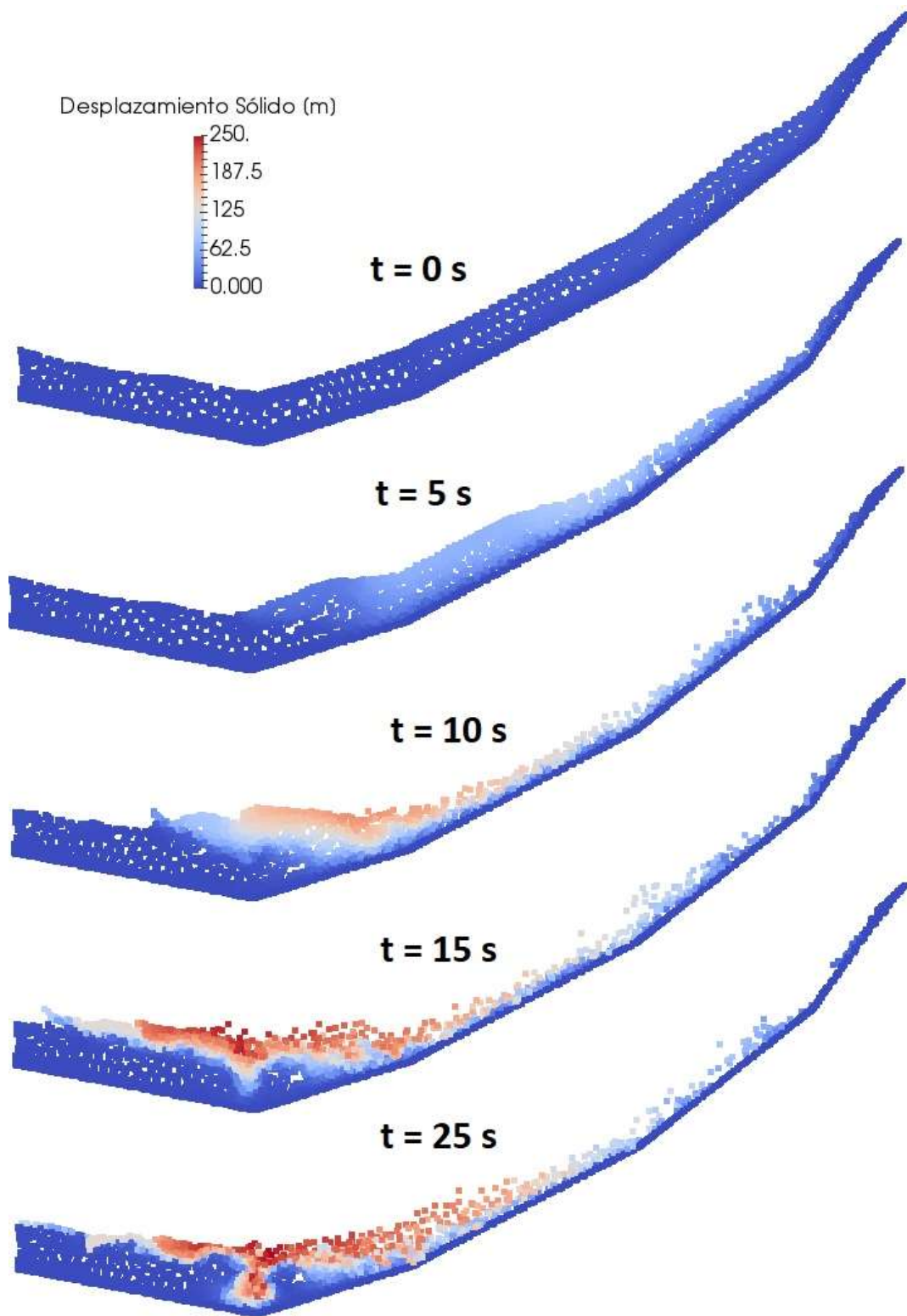


Figura 32: Evolución del flujo para el caso seco, MC con reblandecimiento y ángulo de fricción residual de 5° .

6.3. Comparativa dinámica de los distintos casos

A continuación, se realiza una comparativa de parámetros dinámicos obtenidos en los distintos casos analizados. Concretamente, se analiza el tiempo que dura el flujo de tierra y el recorrido que realiza. Los parámetros obtenidos en los casos se comparan con los observados en el caso real sucedido en mayo de 2018:

Tabla 7: Comparativa de parámetros dinámicos.

Modelo Constitutivo	Caso	Duración Flujo	Recorrido
-	Real	≈ 15 s	280 + 100 m
MC estándar	$\phi = 33^\circ; c = 33 \rightarrow 0$	16 s	150 m
MC con reblandecimiento	$\phi_{RESIDUAL} = 20^\circ$	20 s	280 m
	$\phi_{RESIDUAL} = 10^\circ$	17 s	280 + 50 m
	$\phi_{RESIDUAL} = 5^\circ$	16 s	280 + 100 m

Con los modelos realizados, como mejor se reproduce la realidad es con el modelo constitutivo Mohr-Coulomb con reblandecimiento, asignando un ángulo de resistencia post-pico en función de la tensión tangencial de entre 5 y 10°.

7. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo de este trabajo, deducidas del estudio, análisis y discusión de los resultados obtenidos. Las conclusiones se organizan en relación a los objetivos propuestos al inicio de la tesis (apartado 1.2). Asimismo, se propondrán futuras nuevas líneas de investigación en relación a los temas tratados.

- Caracterización geológica y geotécnica del terreno.

Gracias al trabajo realizado por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya y el Conselh Generau d'Aran en los días inmediatos al suceso se ha podido estimar el volumen movilizado en el flujo, que fue de unos 50000 m³. Con la información topográfica de la zona y las descripciones realizadas en los informes técnicos se ha definido topográficamente la ladera posterior al movimiento, permitiendo extrapolar la geometría empleada en los modelos bidimensionales realizados.

A nivel geológico, se diferencian claramente el substrato rocoso en la zona superior y los materiales granulares de origen glacial y coluvial. La variabilidad en la potencia de los substratos y el desconocimiento de la profundidad a la que se encuentra el substrato rocoso en el valle ha dificultado la caracterización geométrica de la zona. Estos problemas se han resuelto situando el substrato rocoso a una profundidad arbitraria en la que no tenga un efecto determinante en los modelos y definiendo un único material granular, ya que las características y parámetros resistentes de ambos son similares.

Se dispone de datos pluviométricos fiables y de buena calidad en la zona y se aprecia una surgencia kárstica de agua en la cabeza del flujo, pero más allá de estos datos, se desconoce totalmente el comportamiento del nivel freático y de las presiones intersticiales en los días previos y durante el flujo.

Los datos más relevantes obtenidos en el laboratorio son la caracterización y los parámetros resistentes del terreno. Los materiales granulares involucrados en el deslizamiento se clasifican, según su granulometría y límites de Atterberg, como arenas arcillosas y ambos tienen un ángulo de fricción similar, unos 33 °. Hubiera sido de gran interés para este trabajo disponer de los parámetros resistentes de pico, pero no se han podido realizar ensayos de corte directo debido a condicionantes ajenos.

El deslizamiento ocurrido en mayo de 2018 en el valle de Valarties es un suceso complejo del que se tiene una buena cantidad de información a nivel cualitativo, pero que, sin embargo, por el alcance de este trabajo, carece de cierta información a nivel técnico más detallada que sería de gran interés.

- Realización de un análisis estático convencional

El análisis estático realizado en este trabajo ha proporcionado resultados coherentes y ha sido un buen punto de partida para los modelos en MPM. Los resultados que se obtienen en un análisis como este dependen mucho de las hipótesis de partida, en este caso de la posición del nivel freático y de la geometría de la superficie de rotura. Tratándose de un enfoque inicial sobre un problema del que se conocía el resultado final, se ha primado la imposición de una superficie de rotura similar a la observada en campo. De esta forma se han obtenido curvas de factor de seguridad unidad en función de los parámetros resistentes del terreno para distintas hipótesis de posición de nivel freático.

Al realizar un análisis convencional queda reflejada la poca información que aporta tal cálculo sobre la potencial peligrosidad de un deslizamiento y pone de manifiesto la necesidad de profundizar en modelos numéricos que permitan realizar dicho análisis con un enfoque dinámico.

- **Comprensión de la base teórica y numérica del MPM y aplicación práctica mediante el código Anura3D**

El método del punto material mezcla conceptos de los modelos continuos eulerianos y de los métodos de partículas. Para la buena comprensión de este método se debe tener una buena base de mecánica de medios continuos y conocimiento sobre modelos continuos, especialmente en el método de los elementos finitos. El MPM es una buena introducción a los modelos de partículas más complejos.

En la realización de un modelo con Anura3D hay tres fases diferenciadas de uso: el pre-proceso, que se realiza con GiD, el cálculo y el post-proceso, para el que se emplea Paraview. El hecho de que se deba cambiar de software añade dificultades y trabas a la funcionalidad y al proceso de aprendizaje, pero ambos programas son bastante intuitivos y su uso es muy similar a cualquier software de interfaz gráfica. Fue de gran ayuda en el manejo de los distintos códigos la asistencia a la 9ª convención de GiD, celebrada en junio de 2018 en Barcelona. Durante los tres días en que tuvo lugar se impartieron conferencias y talleres de GiD y se dedicó una jornada completa al código Anura3D.

- **Modelización del deslizamiento bajo distintas hipótesis.**

Al hecho de trabajar con tantas incertidumbres en cuanto a la caracterización de los materiales y condiciones en las que se produjo el deslizamiento, se le suma los inconvenientes de trabajar con un modelo numérico complejo en fase de desarrollo.

Los casos realizados con este modelo no han sido los que se pretendía realizar en un primer momento. Se destaca el hecho que el efecto del agua, seguro relevante en el desencadenamiento del deslizamiento no ha podido ser incluido por problemas internos al código.

Se ha realizado un caso base que ha servido de buena aproximación para hacerse una idea de los tiempos de cálculo, comprobar resultados y calibrar algunos parámetros. Este caso se ha modelizado como un terreno seco y el material granular con un modelo constitutivo Mohr-Coulomb perfectamente plástico. Se han empleado los valores de la resistencia obtenidos en los ensayos realizado en el laboratorio y, el desencadenamiento del flujo se ha realizado artificialmente reduciendo la cohesión del material.

Es interesante observar que asignar la resistencia al material movilizado suficientemente baja como para iniciar la rotura no permite explicar el comportamiento post-rotura. El desplazamiento observado es significativamente menor. Se observa en el modelo que la masa movilizada se detiene después de 150 metros al alcanzar una nueva situación de equilibrio.

Se plantea, entonces, evaluar la pérdida de resistencia necesaria que pueda explicar el comportamiento observado. Para ello, se ha elegido un modelo Mohr-Coulomb con reblandecimiento con la deformación para caracterizar el material de la ladera. Se observa que el deslizamiento, una vez inestable, acelera y aumenta el alcance. Según los cálculos se observa que es necesario una resistencia significativamente baja (ángulos de fricción inferiores a 10°) para reproducir el alcance del deslizamiento observado.

Los intentos de introducir el agua en el modelo (en condiciones drenadas y no drenadas) han fracasado debido a problemas en el software utilizado que se encuentra en desarrollo.

- **Análisis y discusión de los resultados numéricos obtenidos y análisis de sensibilidad para determinar la robustez de los cálculos.**

De los resultados obtenidos se puede concluir que reproduciendo artificialmente las hipótesis que se cree que tuvieron un efecto determinante en el desencadenamiento y evolución cinemática del deslizamiento ocurrido en mayo de 2018 se ha logrado reproducir la dinámica del flujo. Estas hipótesis son que la saturación del terreno produjo una caída de los parámetros resistentes que desencadenó el movimiento y que la aceleración y alcance que se observaron fueron debidos a fenómenos de rotura progresiva en la ladera.

En lo que se refiere al análisis de sensibilidad y robustez de los cálculos, no se ha realizado finalmente ya que la tesis se ha centrado en varios aspectos y el modelo final ha sido una aproximación inicial, con insuficientes parámetros a calibrar, por lo que tal análisis carece de utilidad.

- **Capacidad del código Anura 3D para modelizar grandes desplazamientos.**

El código Anura3D está diseñado para simular grandes deformaciones e interacciones entre terreno, agua y estructuras. En esta tesis se pretendía simular un deslizamiento de tierras real del que se tienen datos, por lo que es una buena prueba para evaluar la capacidad de modelizar grandes desplazamientos. Se ha logrado reproducir la dinámica observada con la hipótesis de terreno seco e introduciendo los efectos del agua de forma artificial. Al introducir la formulación con fase sólida y líquida han aparecido problemas que no se saben explicar y que podrían ser defectos del código o errores en la introducción de los datos al problema.

- **Vías de futuro desarrollo**

El trabajo realizado en esta tesis tiene un enfoque superficial en algunos temas, en los que se podría profundizar más en un futuro.

En primer lugar, se podría caracterizar el terreno realizando sondeos de la zona para conocer de forma más realista la caracterización geológica del terreno. En el mismo ámbito, se podría llegar a realizar más ensayos con las muestras obtenidas en campo para caracterizar mejor el comportamiento mecánico del material. Se podría realizar ensayos de corte directo en control de deformación para conocer el comportamiento post-pico, hecho que dotaría de mayor certidumbre a las hipótesis de rotura progresiva introducidas de forma artificial en el modelo.

Otra vía de futuro desarrollo sería llegar a modelizar con éxito el fenómeno con terreno saturado, es decir, introduciendo la formulación con dos fases. En un futuro, el código Anura3D, pretende poder simular terrenos no saturados, por lo que sería otra gran prueba para el modelo tratar de simular el deslizamiento de Valarties con estas condiciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

- AL-KAJAJI, I., 2013. Formulation of a Dynamic Material Point Method (MPM) for Geomechanical Problems.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1985. Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards.
- CASTELLVÍ, H. y ALONSO, E., 2015. *El deslizamiento de Selborne. Modelación mediante el Método del Punto Material*.
- CECCATO, F., 2014. *Study of large deformation geomechanical problems with the Material Point Method* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: http://paduaresearch.cab.unipd.it/7478/1/Ceccato_Francesca_tesi.pdf.
- COETZEE, C.J., BASSON, A.H. y VERMEER, P.A., 2007. Discrete and continuum modelling of excavator bucket filling. *Journal of Terromechanics*.
- COETZEE, C.J., VERMEER, P.A. y BASSON, A.H., 2005. The modelling of anchors using the material point method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.
- CONSELH GERAU D'ARAN, 2018. Esbauçament de granes dimensions ena ribèra de Valarties. [en línea]. [Consulta: 22 octubre 2018]. Disponible en: <http://www.conselharan.org/esbaucament-de-granes-dimensions-ena-ribera-de-valarties/>.
- HARLOW, F.H., ELLISON, M.A. y REID, J.H., 1964. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics. , vol. 3, pp. 319-343.
- INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA, 2018. Nota tècnica de la visita realitzada al flux ocorregut a «Era Abelha» de la val de Valarties (Arties, Vall d'Aran).
- MACKENZIE-HELNWEIN, P.P., ARDUINO, P., SHIN, W., MOORE, J.A. y MILLER, G.R., 2010. Modeling strategies for multiphase drag interactions using the material point method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.
- MPM RESEARCH COMMUNITY, 2017a. *Anura 3D Tutorial Manual*. 2017. S.l.: s.n. 2017.2.
- MPM RESEARCH COMMUNITY, 2017b. *Anura3D Scientific Manual*. 2017. S.l.: s.n. 2017.2.
- ROCSCIENCE, 2002. *Slide User's Guide*. 2002. S.l.: s.n.
- SEGURA, C., 2018. Un vessament d'argila amenaça el Garona al seu pas per la Vall d'Aran. *El País* [en línea]. 2018. Disponible en: https://cat.elpais.com/cat/2018/09/09/catalunya/1536511262_542135.html.

- SOGA, K., ALONSO, E., YERRO, A. y BANDARA, S., 2016. Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method. *Geotechnique*, vol. 66 (3), pp. 248-273.
- SULSKY, D., CHEN, Z. y SCHREYER, H.L., 1994. A particle method for history-dependent materials.
- WIECKOWSKI, Z.S., YOUN, S.K. y YEON, J.H., 1999. No TitleA particle-in-cell solution to the silo discharging problem. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 45, pp. 1203-1225.
- YERRO, A., 2015. *MPM modelling of landslides in brittle and unsaturated soils*.
- YERRO, A., PINYOL, N. y ALONSO, E., 2015. The material point method for unsaturated soils. *Geothéchnique*, 65.
- ZABALA, F. y ALONSO, E., 2011. Progressive failure of Aznalcollar dam using the material point method. *Geothéchnique*, 61, pp. 795-808.

9. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Índice de figuras

Figura 1: Imágenes del deslizamiento tomadas 10 días después del suceso.....	9
Figura 2: Discretización espacial en MPM (Yerro 2015).....	13
Figura 3: Mapa de situación del deslizamiento; en la esquina superior derecha situación del Valle de Arán dentro de Catalunya. Fuente Google Maps.....	17
Figura 4: Imágenes tomadas el día posterior del suceso (12/11/18) y cedidas por técnicos del Conselh Generau d'Aran. En la imagen de la izquierda se aprecia la cicatriz del flujo; en la imagen de la derecha se observa el remonte de material permitiendo el paso del río Valarties, aguas arriba del pueblo de Arties.....	17
Figura 5: Detalle de la zona en la que se produjo el deslizamiento; se aprecia la zona afectada por este (naranja), el pueblo de Arties y las infraestructuras cercanas (carretera C-28, pista forestal de Valarties, cantera, planta de áridos y central hidroeléctrica de Arties). Fuente Google Earth.	18
Figura 6: Detalle en planta del flujo. En verde la superficie de rotura, en rosa la zona de transporte, en rojo el cono de deyección del material transportado por el torrente formado y en gris el material acumulado en la ladera opuesta.	19
Figura 7: Situación de la cicatriz a finales de verano, apreciándose el surco socavado por el torrente provocando deslizamientos laterales (imagen izquierda), transporte de sedimento fino en el río Garona en el pueblo de Casarilh, 4 km aguas abajo del flujo de tierras (imagen derecha).	19
Figura 8: Material coluvial con la humedad natural post-rotura (izquierda) y material seco y disgregado (derecha).	21
Figura 9: Material de origen glacial con la humedad natural post-rotura (izquierda) y material seco y disgregado (derecha).	21
Figura 10: Detalle de la parte superior de la cicatriz de rotura donde se aprecia el substrato rocoso, la surgencia kárstica y el torrente que se forma.	22
Figura 11: Topografía previa (línea roja) y posterior (línea negra) al flujo producido en mayo de 2018.....	22
Figura 12: Curva granulométrica y tabla resumen de los límites de Atterberg para ambas muestras involucradas en la rotura.	23
Figura 13: Clasificación de ambos suelos según Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.	23
Figura 14: Consolidación de las muestras bajo los distintos escalones de carga.	24
Figura 15: Deformación de las muestras bajo el proceso de corte anular para los distintos escalones de carga.	24
Figura 16: Gráfico tensión tangencial-desplazamiento vertical en el que se puede apreciar el punto de rotura para los distintos escalones de carga en cada muestra.	25
Figura 17: Envolvente de rotura Mohr-Coulomb para ambas muestras de suelo.....	25
Figura 18: Geometría y materiales empleados en el modelo estático de equilibrio límite.....	27
Figura 19: Ejemplo de resultados del modelo estático para cada una de las hipótesis propuestas con cohesión 25 kPa.....	28
Figura 20: Curvas FS=1 para distintas hipótesis de posición de NF con superficies de rotura circulares.	28
Figura 21: Curvas FS=1 para distintas hipótesis de posición de NF con capa débil coincidente con superficie de rotura.....	29
Figura 22: Geometría y materiales empleados en el modelo.	31
Figura 23: Restricciones cinemáticas aplicadas en el modelo.	33

Figura 24: Características de la malla euleriana empleada en los cálculos.	34
Figura 25: Desplazamiento obtenido en la parte superior de la ladera tras la fase de inicio con cohesión 30 kPa.....	37
Figura 26: Desplazamiento obtenido en la parte superior de la cicatriz después de la fase de inicio bajo distintas hipótesis de cohesión.	37
Figura 27: Tensión vertical total [kPa] tras la fase de inicio en el caso seco y MC estándar.	38
Figura 28: Evolución del flujo en la ladera para el caso seco y MC estándar.....	39
Figura 29:Esquema de un ensayo de corte numérico variando el factor de forma (Yerro 2015).	40
Figura 30: Evolución del flujo para el caso seco, MC con reblandecimiento y ángulo de fricción residual de 20º.	41
Figura 31: Evolución del flujo para el caso seco, MC con reblandecimiento y ángulo de fricción residual de 10º.	42
Figura 32: Evolución del flujo para el caso seco, MC con reblandecimiento y ángulo de fricción residual de 5º.	43

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de las características del flujo.....	18
Tabla 2: Precipitación mensual en las estaciones EMA del SMC en Aran y precipitación media mensual en el periodo 1961-1990.	20
Tabla 3: Datos pluviométricos de la estación Smarty River en el puente de Valarties.....	20
Tabla 4: Propiedades básicas de la fase sólida y líquida.	32
Tabla 5: Propiedades referentes a los modelos constitutivos materiales.	32
Tabla 6: Esquema de cálculo empleado en el modelo MPM.	35
Tabla 7: Comparativa de parámetros dinámicos.	44